

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

*С. В. Афанасьев, И. А. Голутвин, Н. В. Горбунов,
Ю. В. Ершов, А. И. Малахов, В. А. Смирнов*, Е. В. Сухов,
В. В. Устинов, Б. С. Юлдашев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты исследований по разработке методов повышения радиационной стойкости детекторов на основе органических пластических сцинтилляторов для имеющихся и новых экспериментальных установок для работы в области физики частиц высоких энергий. Исследования проводились в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ в течение 2012–2021 гг. Образцы сцинтилляторов разных типов облучались радиоактивными источниками гамма-частиц и нейтронов до высоких уровней поглощенных доз и низких уровней мощности дозы. Методы повышения радиационной стойкости совершенствовались на протяжении 10 лет. Этому способствовало появление новых компактных фотодетекторов, способных регистрировать отдельные кванты света.

The review presents the results of studies on improving the radiation resistance of detectors based on organic plastic scintillators for existing and new experimental setups for high-energy particle physics. The research was carried out at the Laboratory of High Energy Physics of the Joint Institute for Nuclear Research during 2012–2021. Various types of scintillator samples were irradiated with radioactive gamma and neutron sources to high absorbed dose levels and low dose rate levels. Methods for increasing radiation resistance have been improved over the course of ten years, taking into account the emergence of new compact photodetectors capable of registering individual light quanta.

PACS: 07.05.Fb; 62.20.Qp; 29.40.Mc; 81.40.Wx

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для исследований в области физики высоких энергий в многоканальных и многослойных гетерогенных адронных калориметрах в качестве детектирующих элементов часто используются органические пластические сцинтилляторы. Калориметры на основе таких пластических сцинтилляторов, в частности, применяются на Большом

* E-mail: vitsmirnov@jinr.ru

адронном коллайдере в ЦЕРН [1]. Детектирующие слои перемежаются слоями поглотителя, изготовленными из тяжелого металла. Каждый детектирующий слой состоит из множества отдельных сцинтилляторов (тайлов), размеры которых варьируются в зависимости от геометрии физической установки. В качестве тайлов обычно используются пластины сцинтилляторов толщиной 4–5 мм и площадью от 50 до 1000 см². В каждом тайле сбор света осуществляется с помощью спектросмещающего переизлучающего волокна (переизлучателя), затем свет передается на фотодетектор напрямую или через оптическое волокно. В коллайдере встречные пучки сталкиваются в центре установки и возникает множество вторичных частиц. Облучение сцинтилляционных тайлов вторичными частицами приводит со временем к их деградации (уменьшению прозрачности и количества центров сцинтилляции). Деградация зависит от поглощенной дозы прошедших через тайл вторичных частиц, а также мощности дозы [2]. Деградация сцинтиллятора возрастает с уменьшением мощности дозы при той же поглощенной дозе.

Чем дальше тайл расположен от центра соударения пучков, тем меньше поглощенная доза. В более ранних работах определена возможность регистрации света со сцинтилляционного тайла размерами 100 × 100 × 4 мм лишь до поглощенной дозы 5 Мрад [3]. В результате деградации тайла от этой дозы лишь 1/3 света по сравнению с необлученным образцом выходила из сцинтиллятора, что не позволяло надежно регистрировать сигналы фотодетекторами на основе электровакуумных приборов.

Группа ученых Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ представляет обзор исследований, проведенных в течение 2012–2021 гг., по разработке методов повышения радиационной стойкости детекторов, создаваемых на основе органических пластических сцинтилляторов. Как правило, в радиационно стойком сцинтилляционном детекторе используются радиационно стойкие сцинтилляторы, переизлучатели и связанные с ними светопередающие волокна. В большинстве случаев используются перечисленные ниже материалы.

- Полистирольные сцинтилляторы SCSN-81 (максимум спектра излучения 440 нм) с переизлучателями Y-11 (Kugaгау Со., Япония). Y-11 переизлучает голубой свет (максимум спектра поглощения 430 нм) в зеленый (максимум спектра излучения 476 нм) и имеет высокую прозрачность, обеспечивает высокий световыход.

- Сцинтилляторы на основе поливинилтолуола BC-408 (BICRON Со., США) (максимум спектра излучения 425 нм) с переизлучателями Y-11M.

- Сцинтилляторы на основе поливинилтолуола EJ-260 (ELJEN Со., США) (максимум спектра излучения 490 нм) с переизлучателями O-2M (Kugaгау Со.). EJ-260 является сцинтиллятором, излучающим зеленый свет (максимум спектра излучения 490 нм). EJ-260 излучает свет в более длинноволновом диапазоне, чем SCSN-81, и имеет большую радиаци-

онную стойкость, чем сцинтилляторы, излучающие синий свет. O-2M переизлучает зеленый свет (максимум спектра поглощения 535 нм) в оранжевый (максимум спектра излучения 550 нм).

- Полистирольный сцинтиллятор UPS-923A (максимум спектра излучения 425 нм), произведенный в Институте сцинтилляционных материалов (Харьков, Украина).

- Полистирольные сцинтилляторы SC-301 (максимум спектра излучения 420 нм) и SC-307 (максимум спектра излучения 416 нм), произведенные в ИФВЭ (Протвино).

- Полистирольный сцинтиллятор ЛВЭ (максимум спектра излучения 425 нм), произведенный ранее в Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ) ОИЯИ.

Радиационную стойкость сцинтилляционных детекторов можно также повысить при улучшении светосбора в тайле за счет:

- секционирования тайла на несколько секций, в каждой из которых свет собирает свой переизлучатель (секция намного меньше тайла и обеспечивает лучший светосбор [4, 5], оптическое «ИЛИ» собирает свет со всех секций тайла, образуя один канал передачи света в фотодетектор);

- использования сверхчувствительных кремниевых ФЭУ (SiPM) вместо электровакуумных приборов, позволяющих измерять слабые сигналы света;

- уменьшения размеров тайла до 20×20 мм и расположения SiPM на поверхности тайла, что позволяет отказаться от волокон, собирающих и передающих свет, и улучшить светосбор.

Следует отметить, что охлаждение SiPM до -30°C позволяет измерять более слабые световые сигналы.

1. ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОСБОРА С СЕКЦИОНИРОВАННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ТАЙЛОВ

Нами было проведено изучение светосбора с секционированных тайлов. Все секции тайла изолированы друг от друга по свету. Были приготовлены образцы-тайлы из сцинтилляторов SCSN-81 и переизлучателей Y-11, состоящие из основного образца-тайла и нескольких отдельных секций. Измерен светосбор с основного образца и секционированных образцов, равных по размеру основному, но состоящих из изолированных секций (рис. 1, б). Секции были в виде полос, количество которых могло быть разным: 2, 4, 8 и 16. Каждый тайл имеет для сбора света свой переизлучатель. Все переизлучатели оптически объединены в рамках одного тайла.

Основной тайл (сигма-тайл) — это сцинтилляционная пластина без выделенных полос внутри нее размером 100×100 мм и толщиной 4 мм (рис. 1, а). Положение переизлучателя показано на рис. 2. Похожий образец использовался в Фермилабе (США) более чем 20 лет назад [6]. Изображение канавки для переизлучателя напоминает греческую букву σ .

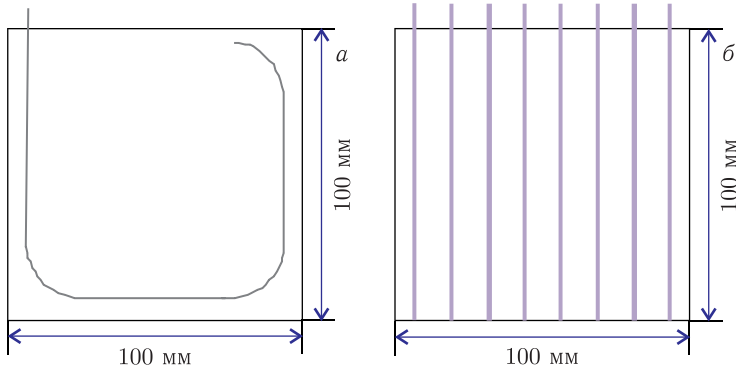


Рис. 1. а) Сигма-тайл с переизлучателем; б) секционированный (8 секций) тайл

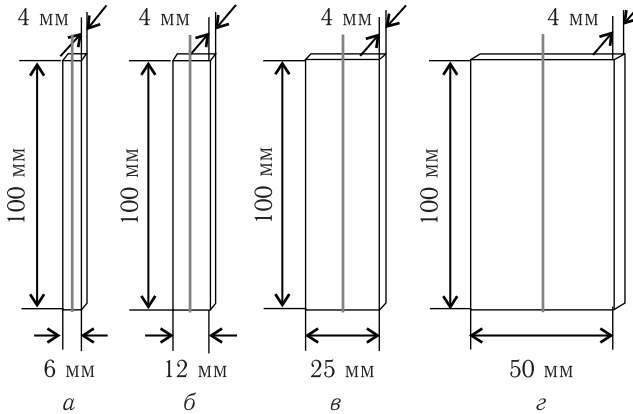


Рис. 2. Форма и размеры полос-секций и расположение переизлучателей в каждой секции

Ширины полос в разных образцах составляли $1/2$ (рис. 2, г), $1/4$ (рис. 2, в), $1/8$ (рис. 2, б) и $1/16$ (рис. 2, а) от ширины основного тайла. Переизлучатель располагался вдоль каждой полосы по центру (рис. 2). Улучшение светосбора достигается за счет уменьшения площади полос по отношению к основному образцу. Влияние потемнения сцинтиллятора в полосе уменьшается, так как уменьшаются усредненный путь распространения света от места его образования до переизлучателя и, соответственно, потери света в облученном образце.

2. ОБЪЕДИНЕНИЕ СВЕТА С СЕКЦИЙ ТАЙЛА

В секционированных тайлах необходимо передать свет со всех переизлучателей тайла в одно волокно, подводящее свет к фотодетектору. На рис. 3 показано объединение двух волокон в одно, которое можно

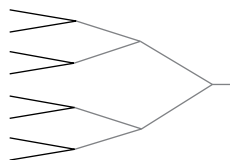
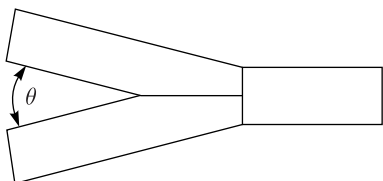


Рис. 3. Структура оптического «ИЛИ» Рис. 4. Передача света с 8 волокон в одно

назвать оптическим «ИЛИ». Свет с двух волокон передается в одно волокно.

Организация передачи света с 8 волокон в одно показана на рис. 4. Использование нескольких оптических «ИЛИ» образует трехступенчатую структуру. Число переизлучателей n_{wls} должно быть таким, чтобы выполнялось равенство $n_{wls} = 2^N$, где N — число уровней объединения. В этом случае свет от каждого входного волокна приходит к выходу объединения с одинаковым весом.

Использование оптических «ИЛИ» вносит дополнительные потери света. Коэффициент k определяет потерю света в одном оптическом «ИЛИ» ($k < 1$). Светопотери в оптическом «ИЛИ» возрастают с увеличением угла θ между двумя входными волокнами. Более подробное описание такой структуры дано в работе [7]. В нашем случае коэффициент равен $k \approx 0,7$.

3. ОЦЕНКА СВЕТОСБОРА В СЕКЦИОНИРОВАННОМ ТАЙЛЕ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ

Мы предположили, что величина выходного сигнала $A(D)$ в значительной степени определяется параметрами, которые влияют на прозрачность сцинтиллятора и переизлучателя. Облучение образцов приводит к уменьшению прозрачности сцинтиллятора и переизлучателя в зависимости от величины поглощенной дозы D . Для оценки $A(D)$ была предложена следующая эмпирическая формула:

$$A(D) = S(W)k^N f_1 \left(\frac{W}{\lambda_{sc}(D)} \right) f_2 \left(\frac{L}{\lambda_{wls}(D)} \right) J_{sc}(D) J_{wls}(D), \quad (1)$$

где $S(W)$ — амплитуда выходного сигнала света с необлученной секции шириной W ; f_1 — уменьшающий фактор для сцинтилляционной секции шириной W , имеющей коэффициент поглощения света $\lambda_{sc}(D)$ при поглощенной дозе D ; f_2 — уменьшающий фактор для переизлучателя длиной L , имеющего коэффициент поглощения света в $\lambda_{wls}(D)$ при поглощенной дозе D ; $J_{sc}(D)$ — уровень деградации сцинтиллятора по световыходу при поглощенной дозе D ; $J_{wls}(D)$ — уровень деградации (изменение конверсионной эффективности) переизлучателя при поглощенной дозе D ;

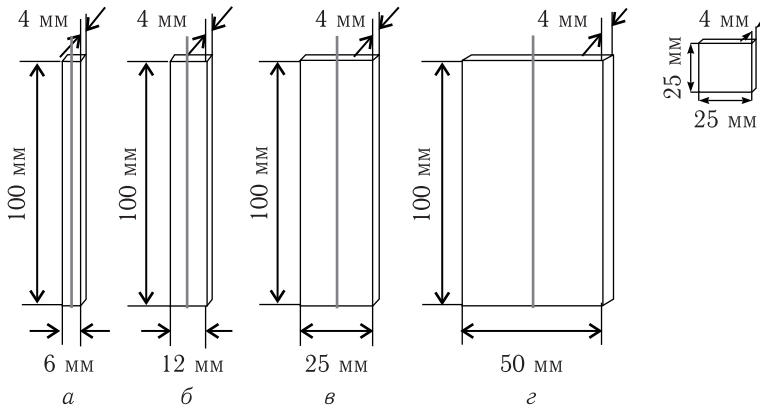


Рис. 5. Набор образцов секций для определения факторов, используемых в формуле (1)

k — светопотери в одном оптическом «ИЛИ»; N — количество уровней оптического «ИЛИ».

Значение этих факторов было определено экспериментальным путем [8]. Для этого был приготовлен набор образцов на основе сцинтилляторов SCSN-81 и переизлучателей Y-11 (рис. 5) — по 10 образцов каждого типа. Образцы-полоски содержали переизлучатели, которые проходили точно по центру каждого образца. Последний квадратный образец размерами $E = 25$ мм и $W = 4$ мм предназначался для измерения потерь света в сцинтилляторе при разных уровнях облучения. Предварительно до облучения были выполнены следующие измерения:

- 1) световыхода с каждого образца (проводилось на стенде с радиоактивным источником ^{90}Sr);
- 2) потерь света в образцах (набор из шести образцов помещался на фотокатод ФЭУ, и измерялась амплитуда сигнала (рис. 6));
- 3) потери света в переизлучателях.

Подготовленные образцы облучались электронами (4 МэВ) в Национальном научно-учебном центре физики частиц и высоких энергий БГУ (Минск). Образцы были облучены до следующих доз: 0,5; 1; 5;

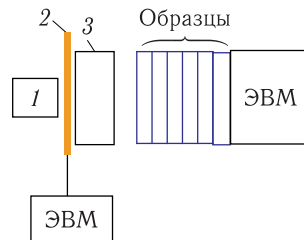


Рис. 6. Установка для измерения световыхода из образцов-тайлов с помощью источника бета-излучения ^{90}Sr : 1 — источник бета-излучения ^{90}Sr ; 2 — переизлучатель сцинтилляционного монитора; 3 — сцинтилляционный монитор

10 и 30 Мрад. Измерение световых выходов со всех образцов проводилось с помощью источника бета-излучения ^{90}Sr . Результаты измерений со всех образцов были нормированы на величину сигнала, полученного с сигма-тайла.

Проводились измерения световых потерь в сцинтилляторе и переизлучающем волокне. Для определения времени восстановления прозрачности сцинтиллятора и переизлучателя измерения повторялись каждый день в течение нескольких суток.

Вычисленные значения световых выходов со всех типов секций основаны на полученных нами экспериментальных данных (источник света находился на расстоянии 2 мм от переизлучающего волокна) [8] и приведены на рис. 7. Эти данные были нормированы на сигнал, полученный с необлученного сигма-тайла.

По результатам измерений были определены коэффициенты поглощения света в сцинтилляторе λ_{sc} (рис. 8, а) и переизлучателе λ_{wls} (рис. 8, б) для каждой величины поглощенной дозы. Определены также уровни деградации сцинтиллятора J_{sc} (рис. 9, а) и переизлучающего волокна J_{wls} (рис. 9, б).

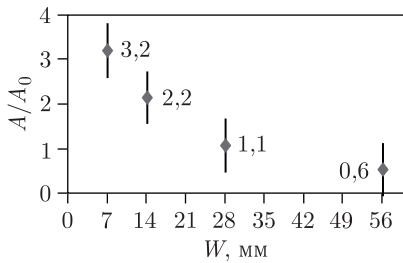


Рис. 7. Зависимость относительной амплитуды сигнала от ширины секции (A — сигнал с облученной секции, A_0 — сигнал с необлученного сигма-тайла, W — ширина облучаемой секции)

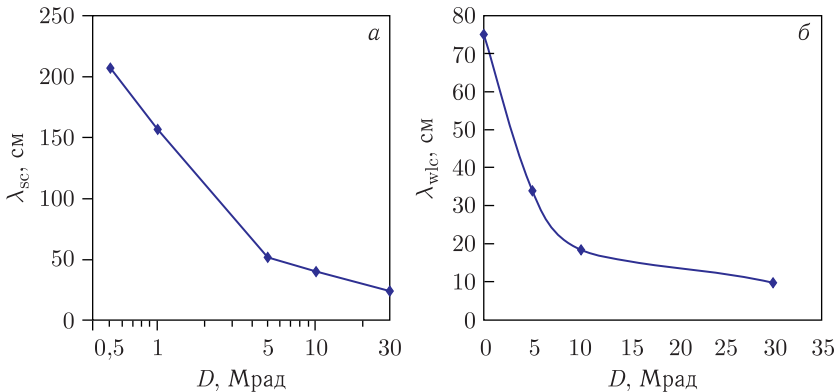


Рис. 8. Значения «измеренных» коэффициентов поглощения света в сцинтилляторе λ_{sc} (а) и в переизлучателе λ_{wls} (б) для каждой величины поглощенной дозы

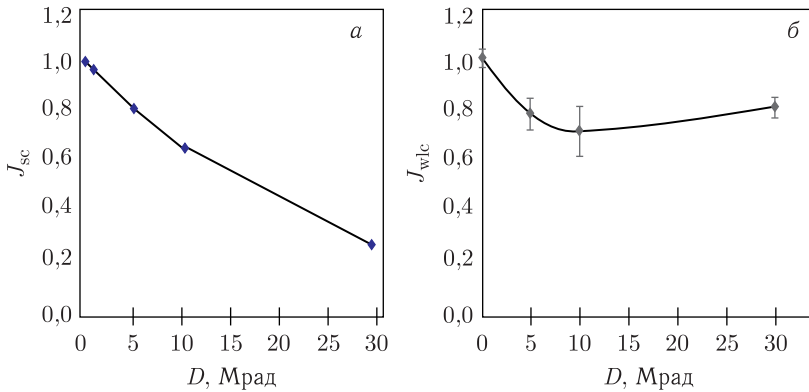


Рис. 9. Значения «измеренных» уровней деградации сцинтиллятора J_{sc} (а) и переизлучающего волокна J_{wlc} (б)

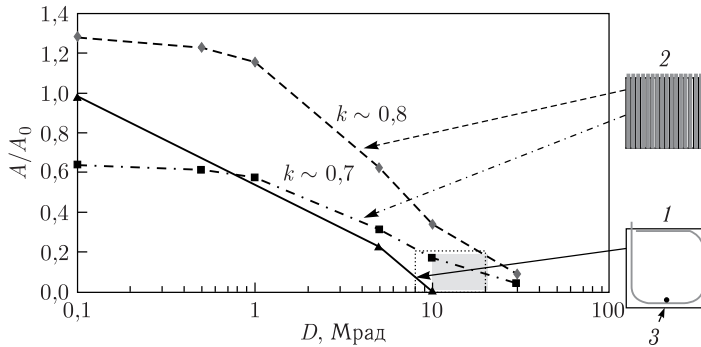


Рис. 10. Вычисленные результаты световыхода для сигма-тайла и секционированного тайла на основе экспериментальных данных: 1 — сигма-тайл; 2 — секционированный образец; 3 — положение источника света

Измерения световыхода с сигма-тайла и тайла с 16 выделенными секциями были проведены в одинаковых условиях. Вычисленные значения даны при следующих значениях коэффициента: $k \sim 0,7$ и $\sim 0,8$.

По предыдущим измерениям, проведенным на тайле, подобном сигма-тайлу, можно предположить его нормальное функционирование вплоть до получения суммарной поглощенной дозы 5 Мрад [3]. В выделенной области на рис. 10 видна возможность увеличения радиационной стойкости секционированного тайла вплоть до суммарной поглощенной дозы 20 Мрад.

4. ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 4 МэВ

Облучение образцов было также проведено в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Белоруссии коллимированными пучками гамма-излучения большой мощности. Источником гамма-излучения служил ^{60}Co активностью 0,2 МКи.

На рис. 11, *а* показаны образцы сцинтилляционных (SCSN-81) пластин, один из образцов содержит переизлучатель. Для размещения образцов на пучке гамма-квантов использовался пластиковый контейнер, в котором находились образец без переизлучателя и пленочный дозиметр (рис. 11, *б*). Размер образца $60 \times 48 \times 4$ мм.

Часть образцов была облучена до дозы в несколько мегарад для определения зависимости световыхода от поглощенной дозы. На рис. 12 показаны два экспериментально найденных значения, которые позволили экстраполировать кривую вплоть до дозы 10 Мрад. Следует отметить, что значение световыхода для дозы 5 Мрад согласуется с данными более ранних измерений [3].

Следующие измерения были проведены с целью изучения эффекта мощности дозы. В процессе облучения в одном наборе образцов сум-

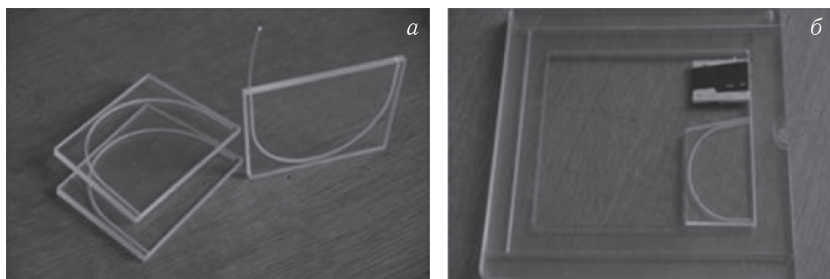


Рис. 11. Пластиковые образцы: *а*) три образца (один из них с переизлучателем), приготовленные для облучения; *б*) образец внутри пластикового контейнера с пленочным дозиметром

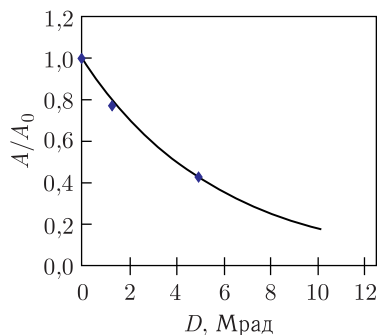
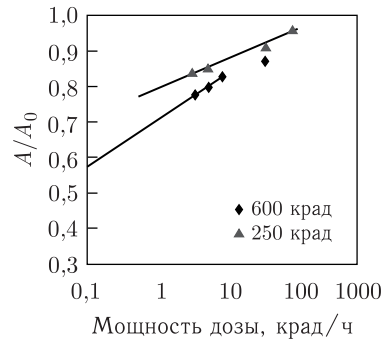


Рис. 12. Зависимость световыхода от полной поглощенной дозы и экстраполяция данных до 10 Мрад (отношение сигналов A с облученных образцов к сигналу A_0 с необлученного образца)

Рис. 13. Зависимости относительного световыхода от мощности дозы для облученных образцов сцинтиллятора SCSN-81. Измерения проведены спустя 7 сут после облучения (отношение сигналов A с облученных образцов к сигналу A_0 с необлученного образца)



марная поглощенная доза составила 250 кр/ч, а в другом — 600 кр/ч. Мощность дозы менялась для разных образцов. На рис. 13 приведены графики зависимостей относительного световыхода от мощности дозы для облученных образцов. Прямыми линиями показана экстраполяция экспериментальных данных в область очень малых мощностей доз, которые могут возникнуть в реальном эксперименте, но которые невозможно получить во время исследования образцов.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ ТАЙЛОВ, ОБЛУЧЕННЫХ МОЩНЫМ ИСТОЧНИКОМ ГАММА-КВАНТОВ

Для исследования были изготовлены образцы из сцинтилляторов BC-408 и EJ-260. Переизлучатель укладывался в канавку, прорезанную в центре каждого образца (рис. 14). Глубина канавки составляла 1,8 мм, а ширина 1 мм. Поверхность канавки не полировалась.

Переизлучатель имел диаметр 0,91 мм и вставлялся в канавку без оптической смазки. Большинство измерений проводилось с волоконным переизлучателем, не имеющим зеркальную поверхность на конце волокна, противоположном фотодетектору. Переизлучатель Y-11 длиной 105 мм использовался для сцинтиллятора BC-408, переизлучатель O-2M длиной 145 мм — для сцинтиллятора EJ-260.

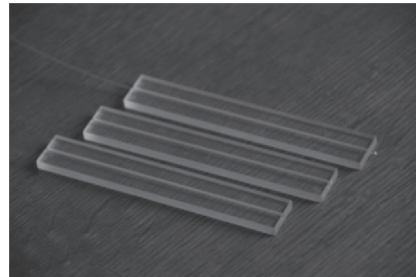


Рис. 14. Сцинтилляционные образцы с установленными переизлучателями

Образцы облучались гамма-квантами от источника ^{60}Co до поглощенной дозы в диапазоне от 5 до 30 Мрад при различных мощностях дозы. Облучение было выполнено в Институте ядерной физики (ИЯФ) в Ташкенте на гамма-установке бассейнового типа с источниками радио-

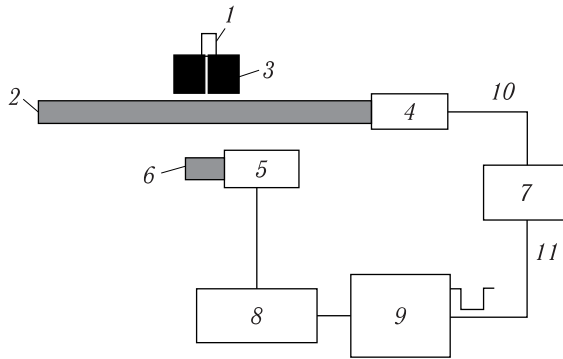


Рис. 15. Схема стэнда для проведения измерений с радиоактивным источником: 1 — бета-источник ^{106}Ru ; 2 — исследуемый образец; 3 — коллиматор; 4, 5 — SiPM; 6 — счетчик запуска; 7 — ЗЦП; 8 — усилитель; 9 — дискриминатор; 10 — измеряемый сигнал; 11 — сигнал разрешения

активного ^{60}Co , суммарная активность которых равна 85 000 Ки. Зона облучения установки состоит из трех колодцев пятиметровой глубины, заполненных охлаждающей водой. Существует возможность обеспечить облучение с мощностью дозы от 0,022 до 0,6 Мрад/ч. Температура внутри каждого из каналов облучения находится на уровне 30–50 °С, градиент поля гамма-излучения $\sim 8\%$. Источник излучает гамма-кванты с энергией $E = 1,173$ и 1,333 МэВ. Доза облучения и мощность дозы измерялись набором пленочных и стеклянных дозиметров, размещенных в сборке с облучаемыми образцами.

Измерение световых выходов с облученных образцов выполнялось в ОИЯИ (Дубна) электронами от источника ^{106}Ru . На рис. 15 приведена схема стэнда для проведения измерений с радиоактивным источником.

Порог регистрации сигнала со счетчика запуска был $\sim 0,5$ МэВ. Полуширина пятна излучения бета-источника на поверхности образца была равна 1,5 мм. Энергия, выделяемая электроном в сцинтилляционном образце, была с точностью 10% и равна энергии, выделяемой минимально ионизирующей частицей. В качестве фотодетектора использовался SiPM. Сигнал с фотодетектора усиливался и поступал на вход зарядово-цифрового преобразователя (ЗЦП). На вход разрешения ЗЦП приходил сигнал шириной 100 нс, сформированный дискриминатором сигнала со счетчика запуска. Измерения проводились через ~ 120 сут после облучения. Измерение каждого образца выполнялось многократно, чтобы определить статистическую ошибку измерения.

На рис. 16 приведены распределения амплитуд сигналов, которые получены со сцинтилляционных (BC-408) образцов, облученных до значения 25 Мрад при различных значениях мощности дозы. Амплитуда сигнала уменьшалась с уменьшением мощности дозы.

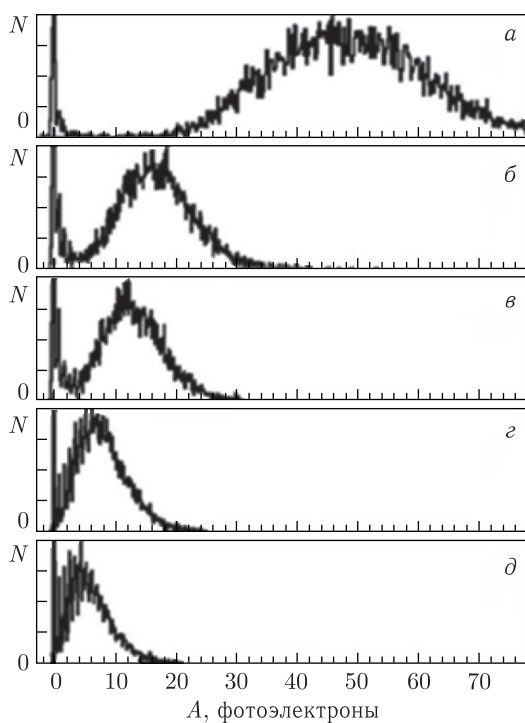


Рис. 16. Распределения амплитуд сигналов с образцов (BC-408), облученных до 25 Mrad при следующих значениях мощности дозы: а) необлучен; б) 0,6 Mrad/ч; в) 0,2 Mrad/ч; г) 0,04 Mrad/ч; д) 0,02 Mrad/ч

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ НА ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2М

Облучение нейтронами выполнено на импульсном ядерном реакторе ИБР-2М (ОИЯИ). Проведено несколько сеансов облучения. Для первого сеанса [9] были подготовлены два набора образцов, состоящих из сцинтилляционных пластин SCSN-81 размерами $25 \times 25 \times 4$ мм. Торцы пластин не полировались. В каждый набор входило шесть образцов. Один набор был облучен нейтронами, второй являлся контрольным.

Образцы, приготовленные для облучения, были установлены на нейтронном канале. Все шесть образцов располагались в плоскости, перпендикулярной направлению пучка нейтронов. Перед образцами был установлен экран из листа толстого алюминия (50 мм) для подавления гамма-фона. После облучения образцы выдерживались в течение 42 сут, чтобы наведенная активность снизилась до уровня естественного фона.

Визуальное обследование облученных образцов показало, что они слегка пожелтели. Измерение световыхода и коэффициента поглощения света проводилось с использованием радиоактивных источников ^{90}Sr и ^{241}Am следующим образом.

Стопка из шести образцов размещалась на фотокатоде ФЭУ (см. рис. 6). Источником света служил дополнительный сцинтиллятор толщиной 10 мм с установленным на нем радиоактивным источником ^{90}Sr . Переизлучатель находился вблизи источника света и передавал световой импульс на второй ФЭУ, который обеспечивал сигнал запуска для измерения. Измерения проводились следующим образом:

- 1) подготовка стопки из шести необлученных образцов;
- 2) измерение света, проходящего через стопку из шести необлученных образцов;
- 3) последовательная замена в стопке необлученного образца на облученный образец и повторение измерений после каждой замены;
- 4) в последнем измерении свет проходит через шесть облученных образцов.

Результаты измерений ослабления света в облученных образцах относительно контрольных приведены на рис. 17.

Была выполнена аппроксимация данных экспонентой: $A = 148,5 \exp(-T/T_0)$, где A — амплитуда сигнала в каналах АЦП, T — полная толщина стопки облученных образцов (в миллиметрах), $T_0 = (245,3 \pm 39,3)$ мм. Потеря света в стопке облученных образцов (24 мм) на 9% больше, чем в контрольной стопке. Рабочие условия, такие как телесный угол отражения света от торцевых граней образцов и ряд других неконтролируемых факторов, были одни и те же для всей серии измерений.

Измерения по определению световыхода проводились с использованием альфа-частиц радиоактивного источника ^{241}Am . Альфа-частицы имеют короткий пробег (около 50 мкм), в органическом сцинтилляторе они теряют свою энергию в поверхностном слое образца. Сцинтилляционный свет прошедших альфа-частиц возникает непосредственно в исследуемом

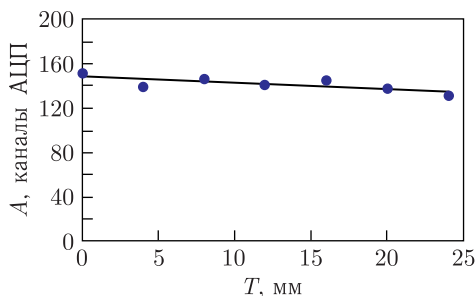


Рис. 17. Зависимость амплитуды сигнала от толщины облученного сцинтиллятора (количества образцов). Значения амплитуд получены экспериментально, линия проведена на основе экспоненциальной аппроксимации

образце и позволяет измерить световыход. Схема измерения описана в работе [8] и приведена на рис. 18.

Определено отношение усредненных амплитуд сигналов с облученного (A) и необлученного (A_0) образцов, которое равно $A/A_0 = (95,2 \pm 1,8) \%$. Показано, что флюенс нейтронов величиной $(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, прошедших через образец сцинтиллятора SCSN-81 размером $25 \times 25 \times 4 \text{ мм}$, привел к уменьшению световыхода образца на 5%.

Одновременно со сцинтилляторами были облучены образцы белой бумаги плотностью 120 г/см^2 , материалы Tyvek и Gore-Tex. Эти материалы часто используются для обертывания сцинтилляторов, чтобы обеспечить диффузное отражение света. Отражающие свойства этих материалов были протестированы до и после облучения. Изменения отражающих свойств не были обнаружены.

Следует отметить, что данные наших измерений для SCSN-81 совпадают с результатами, полученными в лаборатории DESY (Гамбург, ФРГ) для сцинтиллятора SCSN-38 [10]. На рис. 19 показаны для сравнения результаты ОИЯИ (отмечены *) и данные более ранних измерений DESY. Для удобства результаты группы ОИЯИ даны в единицах, использованных в работе [10]: поглощенная доза $D = 20 \text{ кГр}$ и коэффициент поглощения света $\Delta\mu \sim 0,04 \text{ см}^{-1}$.

Во втором сеансе были облучены нейтронами два образца из сцинтиллятора BC-408 и один образец из сцинтиллятора EJ-260. Кроме нейтронов (85%) из канала реактора в пучке частиц присутствовали гамма-частицы (15%).



Рис. 18. Блок-схема стенда для измерения световыхода с облученных образцов

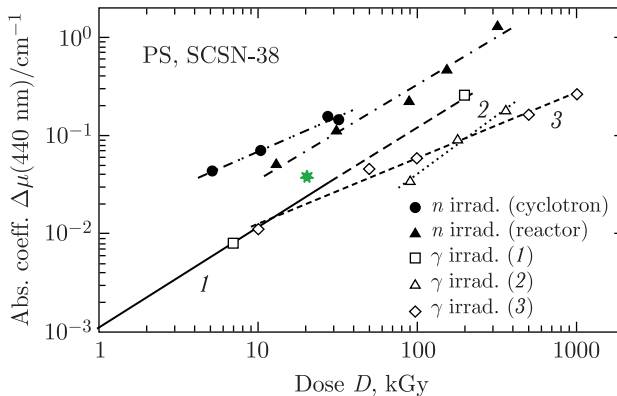


Рис. 19. Результаты группы ОИЯИ (* — SCSN-81) в сравнении с более ранними данными измерений DESY (SCSN-38)

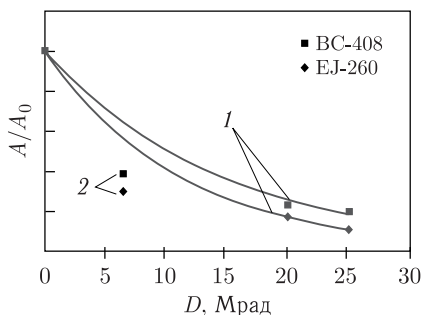


Рис. 20. Результаты, полученные при облучении на ИБР-2М (Дубна) (2), в сравнении с результатами облучения гамма-квантами в ИЯФ в Ташкенте (1) (отношение сигналов A с облученных образцов к сигналу A_0 с необлученного образца)

Интенсивность пучка — 10^9 – 10^{11} см⁻²·с⁻¹ ($\langle E_n \rangle \sim 1$ МэВ, $\langle E_\gamma \rangle \sim 1,5$ – 2 МэВ), мощность дозы — 500 крад/ч. Радиационная доза от гамма-квантов измерялась пленочными дозиметрами FWT-60-00. Флюенс нейтронов измерялся двумя кремниевыми детекторами (100 и 300 мкм).

Было проведено сравнение результатов облучения нейтронами с результатами облучения гамма-излучением от источника ⁶⁰Со для поглощенных доз 20 и 25 Мрад (рис. 20). Относительный световыход (A/A_0) образцов, облученных в ИЯФ в Ташкенте (см. рис. 15), дан для мощности дозы 20 крад/ч. Пленочные дозиметры зарегистрировали 6,5 Мрад поглощенной дозы от облучения гамма-квантами. Кремниевые детекторы показали флюенс нейтронов $2,34 \cdot 10^{15}$ см⁻². Экстраполяция экспонентой данных для каждого типа сцинтилляторов, полученных при облучении гамма-квантами, позволяет оценить эффект совместного облучения нейтронами и гамма-квантами. В результате сравнения выявлено, что облучение нейтронами увеличивает потемнение сцинтиллятора.

7. ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ И СОПУТСТВУЮЩИМИ ГАММА-КВАНТАМИ НА УСТАНОВКЕ ИРЕН (ОИЯИ)

Проведено исследование четырех типов сцинтилляторов: SCSN-81, UPS-923A (ННЦ ХФТИ, Харьков), ВС-408, ЛВЭ (изготовлен в ЛВЭ ОИЯИ) на источнике резонансных нейтронов (ИРЕН) [11, 12]. В состав ИРЕН входят линейный ускоритель электронов и мишень для образования нейтронов, которая обеспечивает выход $2 \cdot 10^{11}$ см⁻²·с⁻¹. Вместе с нейтронами из мишени идет поток гамма-квантов в соотношении $6 \cdot 10^3$ на один нейтрон.

Для облучения были изготовлены следующие образцы сцинтилляторов:

— несколько сигма-тайлов из SCSN-81 с переизлучателем-Y-11, как показано на рис. 1;

— несколько образцов секций из SCSN-81 и UPS-923A толщиной 4 мм, размеры которых варьировались по длине от 60 до 148 мм и ширине от 12 до 20 мм;

— образцы в виде квадрата $25 \times 25 \times 4$ мм, изготовленные из сцинтилляторов SCSN-81, UPS-923A, BC-408 и ЛВЭ. Все образцы были помещены в бумажные коробочки вместе с пленочными дозиметрами FWT-60-00 толщиной 42,5 мкм. Дозиметры были обернуты черной бумагой для защиты от ультрафиолета.

Образцы предполагалось облучать при различных мощностях дозы (от 0,00025 до 0,338 Мрад/ч) в течение 90 сут. Детальная программа облучения была следующая:

- облучение первой группы тайлов SCSN-81/Y-11 до дозы 0,3 Мрад;
- облучение второй группы тайлов SCSN-81/Y-11 до дозы 5,0 Мрад;
- облучение образцов секций до дозы 25 Мрад для проверки преимущества секционированного тайла;
- облучение квадратных образцов до 25 Мрад для последующего измерения световыхода и прозрачности сцинтилляторов в зависимости от поглощенной дозы и мощности дозы.

До начала облучения были проведены измерения световыхода со всех образцов. В качестве эталона был приготовлен сцинтиллятор с установленным на нем источником альфа-частиц ^{241}Am с энергией 5,637 МэВ (рис. 21, *а*). Вначале был измерен свет с эталона (рис. 21, *а*), затем коэффициент поглощения света в образце (рис. 21, *б*), далее был измерен световыход с образца (рис. 21, *в*). На рис. 21, *д* показан источник альфа-частиц, обеспечивающий световую вспышку в исследуемом образце.

Измеренный амплитудный спектр моноэнергетических альфа-частиц является четко выраженным распределением Гаусса (рис. 22).

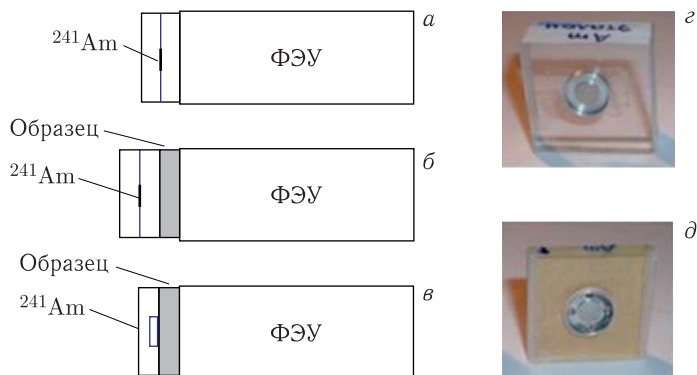


Рис. 21. Стенд для «измерения» коэффициента поглощения света в исследуемом образце и деградации облученного сцинтиллятора

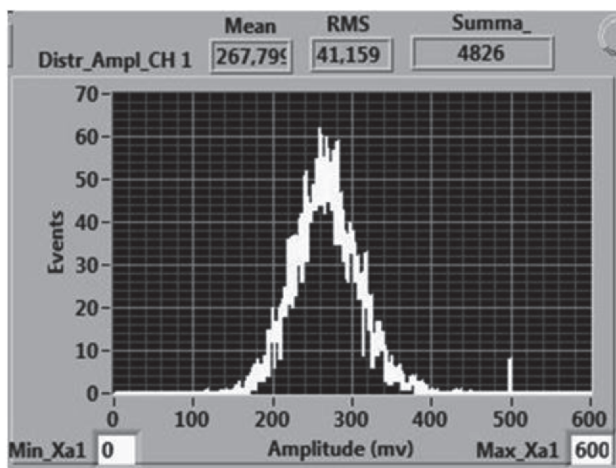


Рис. 22. Распределение амплитуд сигнала из источника альфа-частиц

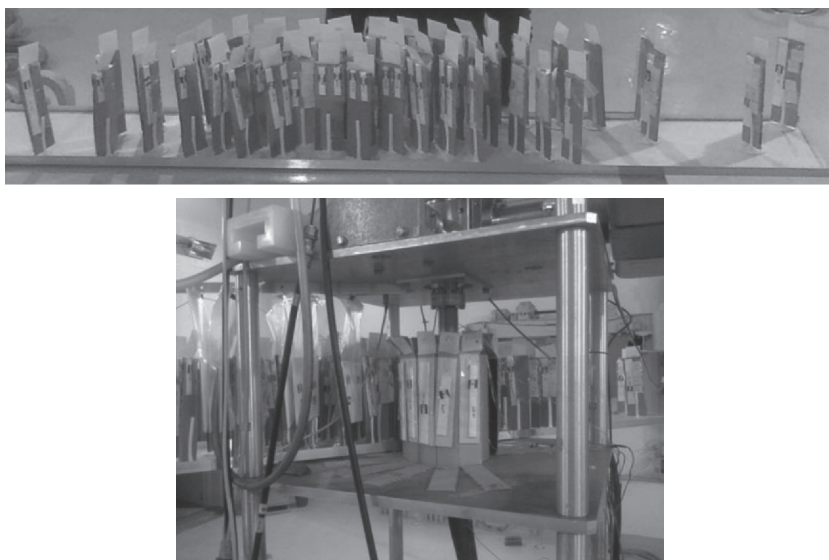


Рис. 23. Размещение образцов вокруг мишени

Образцы размещались вокруг мишени ИРЕН. Мощность дозы в месте нахождения образца зависит от расстояния между ним и источником нейтронов, а также от положения по высоте относительно верхнего края мишени. На рис. 23 показаны образцы, размещенные вблизи мишени.

Измерен световыход со всех необлученных и облученных образцов. На рис. 24 приведена схема стенда для измерения световыхода из образца. Цифровой сигнальный процессор (ЦСП) типа DRS4 преобразует аналоговый сигнал в цифровой, который обрабатывается программой LabView.

На рис. 25 показана интерактивная панель LabView, которая обеспечивает управление процессом набора данных и позволяет проводить их анализ.

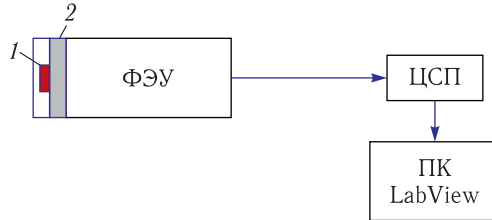


Рис. 24. Схема стенда для измерения световыхода из образца: 1 — радиоактивный источник ^{241}Am ; 2 — образец; ЦСП — цифровой сигнальный процессор; ПК — компьютер

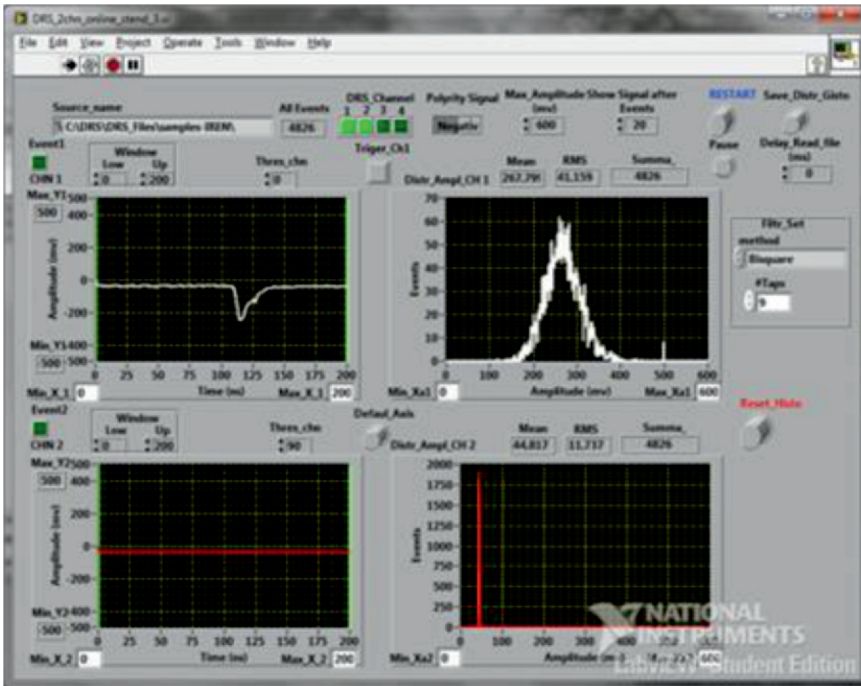


Рис. 25. Интерактивная панель LabView

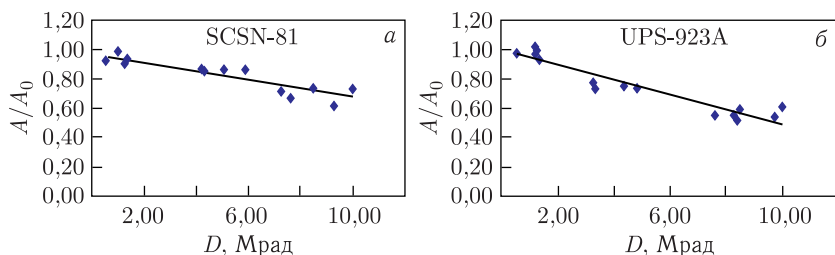


Рис. 26. Распределения световыхода (A) с облученных образцов SCSN-81 (а) и UPS-923A (б), нормированные на световыход (A_0) с необлученного образца, в зависимости от поглощенной дозы D

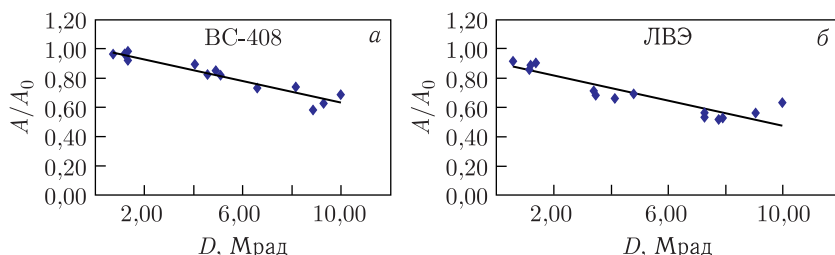


Рис. 27. Распределения световыхода (A) с облученных образцов BC-408 (а) и ЛВЭ (б), нормированные на световыход (A_0) с необлученного образца, в зависимости от поглощенной дозы D

В первую очередь были проанализированы данные измерений световыхода с квадратных образцов ($25 \times 25 \times 4$ мм), которые имели разные уровни поглощенных доз.

На рис. 26 и 27 приведены результаты для сцинтилляторов SCSN-81, BC-408, UPS-923A и ЛВЭ. Поглощенная доза в каждом образце была измерена пленочным дозиметром. Следует отметить, что измеренные значения доз были близки к значениям, которые были рассчитаны предварительно. В данных выделены три группы значений: в диапазонах от 1,0 до 1,4 Mrad, от 3,6 до 4,8 Mrad и от 7,3 до 10 Mrad. В каждой группе находятся данные для разных мощностей доз: от 2 до ~ 100 крад/ч.

На рис. 28 и 29 показаны зависимости относительного световыхода от мощности дозы для сцинтилляторов SCSN-81, BC-408, UPS-923A и ЛВЭ. На каждом графике приведены три зависимости по трем группам поглощенных доз: от 1,0 до 1,4 Mrad, от 3,6 до 4,8 Mrad, от 7,3 до 10 Mrad.

Далее были проанализированы данные с облученных сигма-тайлов. Каждые два тайла образовывали группу, которая была облучена в определенных условиях. Всего создано восемь групп: S1–S8. На рис. 30 показаны зависимости световыхода с сигма-тайлов от мощности дозы. Не обнаружена явная зависимость световыхода от мощности дозы.

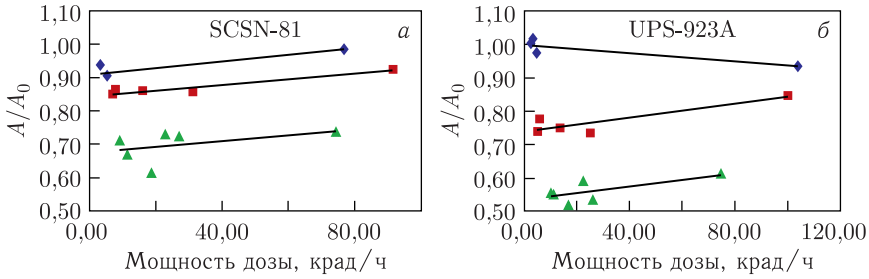


Рис. 28. Распределения световыхода (A) с облученных образцов SCSN-81 (а) и UPS-923A (б), нормированные на световыход (A_0) с необлученного образца, в зависимости от мощности дозы (ромбы — от 1,0 до 1,4 Мрад; квадраты — от 3,6 до 4,8 Мрад; треугольники — от 7,3 до 10 Мрад)

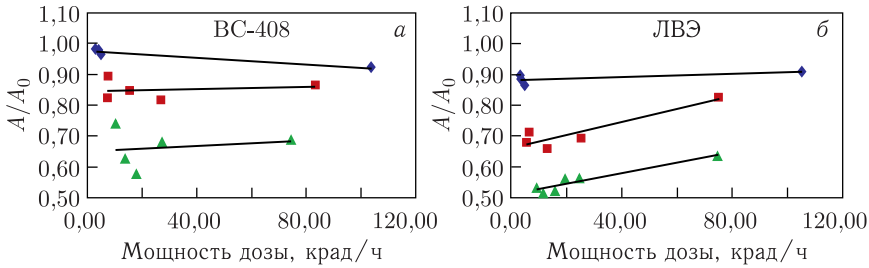


Рис. 29. Распределения световыхода (A) с облученных образцов BC-408 (а) и ЛВЭ (б), нормированные на световыход (A_0) с необлученного образца, в зависимости от мощности дозы (ромбы — от 1,0 до 1,4 Мрад; квадраты — от 3,6 до 4,8 Мрад; треугольники — от 7,3 до 10 Мрад)

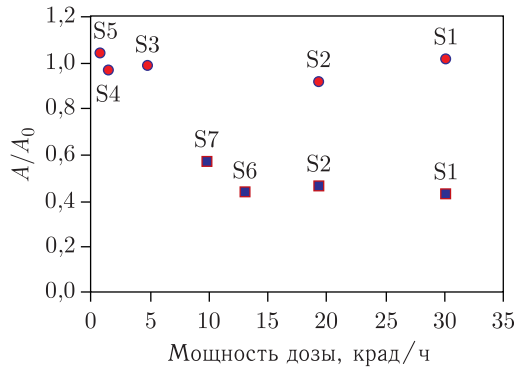


Рис. 30. Зависимости световыхода с сигма-тайлов от мощности дозы для двух значений поглощенной дозы: кружки — 0,2 Мрад; квадраты — 3 Мрад (отношение сигналов A с облученных образцов к сигналу A_0 с необлученного образца)

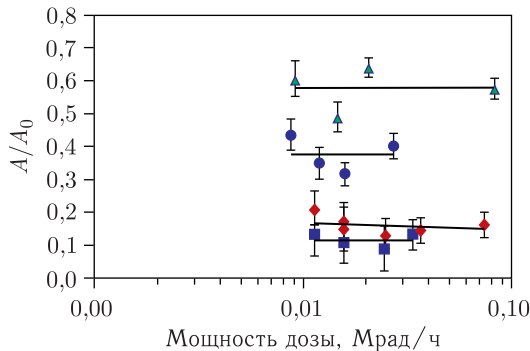


Рис. 33. Зависимости нормированных сигналов от значений мощности дозы для образцов секций по каждому типу сцинтилляторов: треугольники — SCSN-81 (5 Мрад); кружки — SCSN-81 (7–10 Мрад); ромбы — SCSN-81 (13–24 Мрад); квадраты — UPS-923A (13–20 Мрад). Отношение сигналов A с облученных образцов к сигналу A_0 с необлученного образца

от 2 до 100 крад/ч. Облученные образцы для стабилизации параметров выдерживались в течение 30 сут. Измерения световых выходов с образцов проходили с использованием космических мюонов, что позволило воспроизвести практически реальную картину образования и сбора света в сцинтилляторе. Схема измерения приведена на рис. 31.

На рис. 32 показаны результаты измерений амплитуд сигналов с образцов в зависимости от поглощенной дозы. Значение сигнала A , приведенное на графике, нормировано на значение амплитуды в необлученном образце A_0 . Данные для сцинтиллятора SCSN-81 были аппроксимированы экспоненциальной функцией $A/A_0 = 0,8736 \exp(-0,09D)$. На рис. 33 приведены зависимости нормированных сигналов от значений мощности дозы для образцов секций по каждому типу сцинтилляторов.

8. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

Использование кремниевых ФЭУ (SiPM) при создании сцинтилляционных детекторов позволило значительно улучшить светосбор с отдельных тайлов за счет высокой чувствительности этого фотодетектора. SiPM имеет высокую квантовую эффективность — до 50–60%. Небольшие размеры SiPM позволяют разместить его непосредственно на поверхности сцинтиллятора, в результате чего образуется индивидуальный канал регистрации. Используя SiPM, можно уменьшить сцинтилляционную секцию до размеров SiPM. Один сцинтилляционный детектор будет содержать тысячи каналов регистрации. Размещение SiPM на поверхности тайлов использовано при создании детектора ANCAL в коллаборации

CALICE [13]. В случае АНСАL один модуль детектора состоял из печатной платы с размещенными на ней 144 SiPM, а индивидуальные сцинтилляционные тайлы приклеивались к печатной плате. Тайл имел размеры $30 \times 30 \times 3$ мм, в центре его было сделано вогнутое углубление для сбора света. Тайл был обернут пленкой, отражающей свет, с отверстием в месте углубления.

8.1. Исследование световыхода тайла в зависимости от его формы и типа светоизоляции. Для создания сцинтилляционного детектора, состоящего из изолированных по свету тайлов, группа ЛФВЭ ОИЯИ провела цикл работ по исследованию зависимости световыхода отдельного тайла от его формы и светоотражающих свойств материалов, используемых для светоизоляции тайла [14]. Несколько образцов сцинтиллятора было изготовлено в Институте сцинтилляционных материалов (Харьков, Украина). На рис. 34 приведены размеры образцов, изготовленных из сцинтилляторов SCSN-81, BC-408, EJ-260 и UPS-923A. Был сделан специальный стенд для проведения измерений световыхода с образцов. Свет в образцах возникал при прохождении через них космических мюонов, которые эквивалентны частицам с минимальной ионизирующей способностью. Блок-схема стенда показана на рис. 35.

На рис. 36 приведены результаты изучения зависимости световыхода от типа сцинтиллятора (SCSN-81, BC-408, EJ-260, UPS-923A) для тайла, показанного на рис. 31.

Эти образцы были обернуты материалом Tyvek. Наилучший результат (12 фотоэлектронов) был получен в тайле из сцинтиллятора SCSN-81. В дальнейшем именно этот тип сцинтиллятора был использован для изучения свойств светоотражающего материала.

На рис. 37 представлены результаты световыхода с квадратных тайлов (см. рис. 32), имеющих разный тип светоотражающего материала. Проведено исследование зависимости световыхода от типа отражающего покрытия. Для этого были изготовлены три тайла (рис. 38). Один тайл

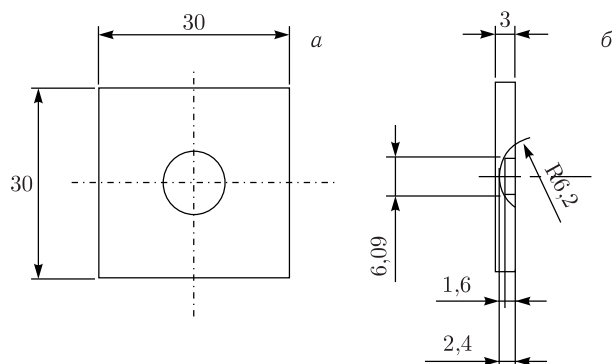


Рис. 34. а) Тайлы квадратной формы; б) размеры и форма углубления (лунка)

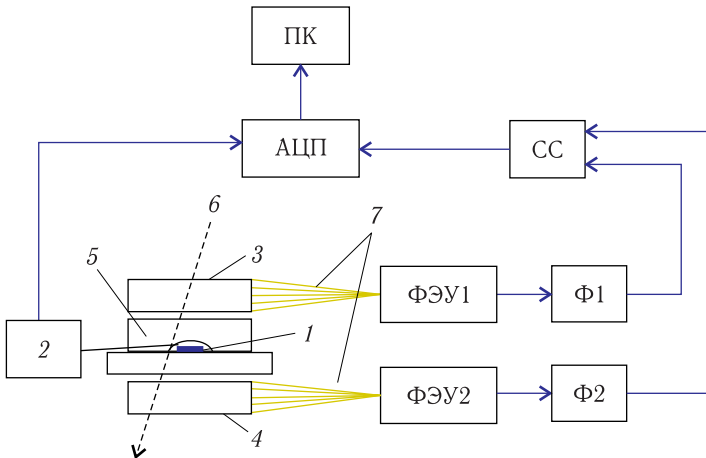


Рис. 35. Блок-схема стенда для измерения световыхода с образцов для исследования световыхода с использованием космических мюонов: 1 — SiPM на подложке; 2 — усилитель; 3, 4 — сцинтилляторы для выделения космического мюона; 5 — образец с лункой для размещения SiPM; 6 — трек космического мюона; 7 — оптоволоконна; Ф1, Ф2 — формирователи сигналов с ФЭУ1 и ФЭУ2; СС — схема совпадений сигнала разрешения для АЦП

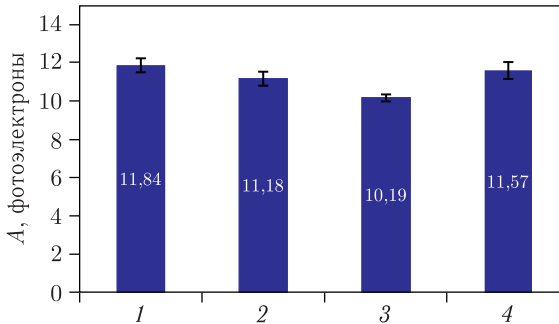


Рис. 36. Результаты измерения световыхода с тайлов из сцинтилляторов: 1 — SCSN-81; 2 — BC-408; 3 — EJ-260; 4 — UPS-923A

был обернут пленкой ESR, в другом использовалась комбинация пленки ESR и материала EJ-510 Reflective, третий тайл был покрашен белой краской на основе TiO_2 . Наилучший результат показало оборачивание пленкой ESR (~ 19 фотоэлектронов). Эта пленка в ~ 2 раза лучше других покрытий.

Проверена повторяемость результатов измерения с квадратных образцов. Для этого было изготовлено по 10 образцов для каждого типа покрытия. На рис.39 приведены результаты проверки повторяемости

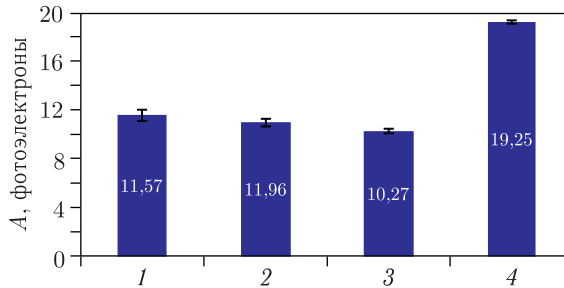


Рис. 37. Результаты измерения световыхода с квадратных тайлов, покрытых светоотражающим материалом разного типа: 1 — пленка Tyvek; 2 — пленка PolyTiO₂; 3 — белая краска на основе TiO₂; 4 — пленка ESR

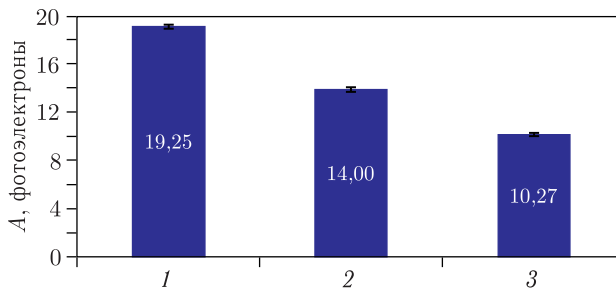


Рис. 38. Зависимость световыхода с тайлов с тремя разными светоотражающими покрытиями: 1 — пленка ESR; 2 — комбинация ESR и материала EJ-510; 3 — краска на основе TiO₂

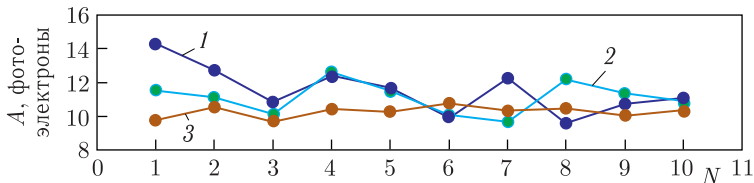


Рис. 39 (цветной в электронной версии). Повторяемость измерений световыхода с N образцов сцинтиллятора UPS-923A, отличающихся типом покрытия: синие кружки, 1 — пленка Tyvek; зеленые кружки, 2 — пленка PolyTiO₂; оранжевые кружки, 3 — белая краска на основе TiO₂

измерений световыхода с образцов, обернутых пленками, и образца, покрашенного белой краской.

8.2. Исследование однородности светосбора с тайла. Проведено исследование по проверке однородности светосбора при появлении вспышки света в разных местах тайла [14]. Для этой работы в качестве источника света использовался пикосекундный лазер. На рис. 40 приве-

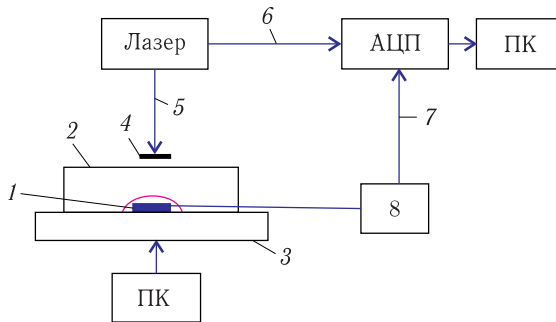


Рис. 40. Блок-схема стенда по измерению световыхода с тайла: 1 — SiPM; 2 — образец-тайл с лункой; 3 — движущийся стол; 4 — фильтр света лазера; 5 — оптоволокно; 6 — сигнал запуска; 7 — измеряемый сигнал; 8 — усилитель



Рис. 41. Экспериментальный стенд для лазерных измерений

дена блок-схема стенда по измерению световыхода. Специализированный движущийся стол обеспечивал прецизионное перемещение тайла в двух направлениях. Этот стенд позволил провести двухмерное сканирование тайла. На рис. 41 показан экспериментальный стенд для лазерных измерений.

На рис. 42 приведены результаты по определению однородности светосбора с трех разных тайлов размером 30×30 мм. Как видно из этого рисунка, повторяемость измерений хорошая. Поэтому дальнейшие измерения проводились на единичных образцах. Выполнено сканирование квадратных тайлов, имеющих размеры 20×20 , 30×30 и 40×40 мм.

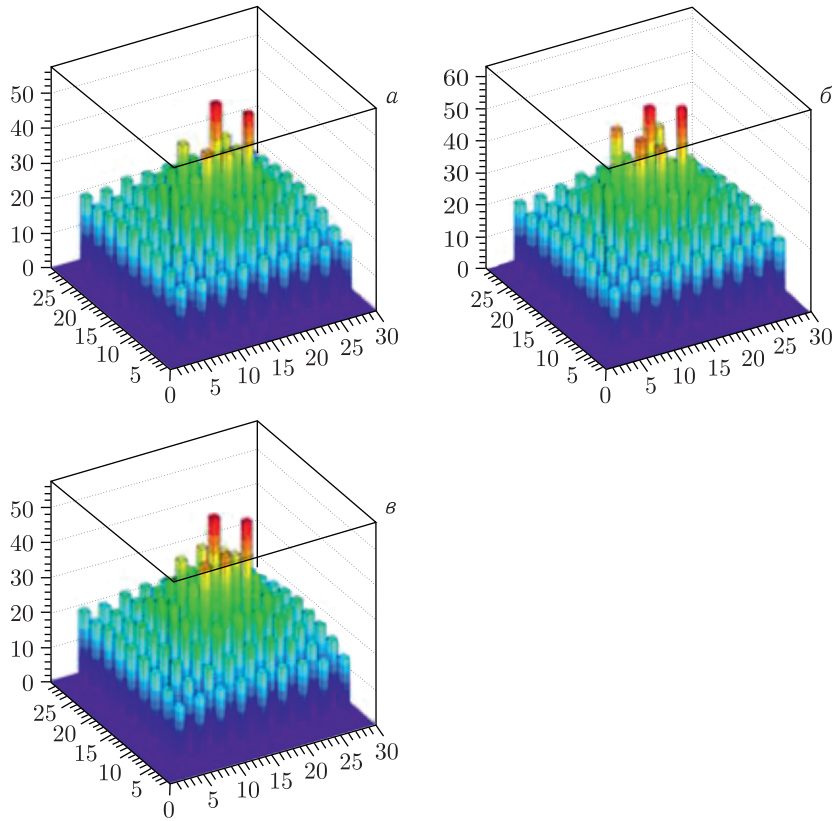


Рис. 42. Результаты двухмерного сканирования трех разных тайлов

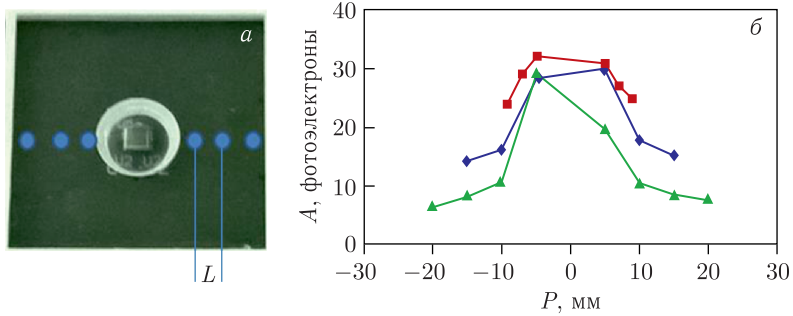


Рис. 43. Сканируемый тайл (вид сверху) (а) и результаты по сканированию (с шагом L) лазером поверхности тайлов (б): ромбы — 30×30 мм; квадраты — 20×20 мм; треугольники — 40×40 мм

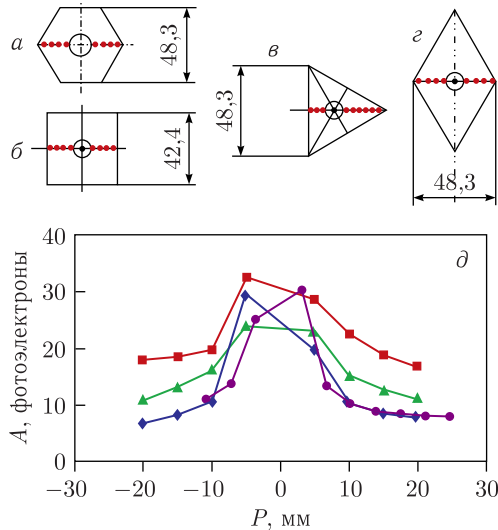


Рис. 44. Формы и площади поверхностей тайлов: а) шестиугольник, 1798 мм²; б) квадрат, 1800 мм²; в) треугольник, 1167 мм²; з) ромб, 2020 мм²). д) Зависимости световыхода от положения пятна лазера на поверхности для каждой формы тайла: ромбы — квадрат; квадраты — шестиугольник; треугольники — ромб; кружки — треугольник

На рис. 43 показан сканируемый тайл (вид сверху). Здесь же приведены зависимости световыхода (A) от положения (P) светового пятна лазера на поверхности тайла.

На рис. 44 приведены результаты однородности светосбора с тайлов в зависимости от их формы: квадратной, ромбической, треугольной, шестиугольной. Наилучшей однородностью обладает сцинтиллятор шестиугольной формы. Световыход увеличивается с уменьшением размеров сцинтилляторов.

8.3. Исследование характеристик SiPM, облученных нейтронами. Для создания детекторов на основе тайлов с фотодетектором, расположенным на его поверхности, требуется использование радиационно стойких SiPM. Группа ЛФВЭ ОИЯИ провела цикл работ по исследованию характеристик SiPM после их облучения нейтронами на реакторе ИБР-2. Основной целью работ являлось определение верхнего предела облучения нейтронами, после которого использование SiPM в качестве фотодетектора станет невозможным. Фотодетекторы должны обеспечить регистрацию частиц с минимальной ионизирующей способностью выше уровня шумов фотодетектора и регистрирующей электроники.

В тестах использовались кремниевые ФЭУ фирмы Hamamatsu MPPC S12571-015P. Их характеристики были измерены до и после облучения. Следует отметить, что облучение оказывает негативное воздействие на

SiPM. Возрастают темновой ток, счет темновых импульсов, уровень шума, напряжение пробоя и рабочее напряжение, перекрестные засветки соседних пикселей. Уровень света в сцинтилляторе от лазерного импульса выбирался таким образом, чтобы он соответствовал уровню света от прохождения через тайл частицы с минимальной ионизирующей способностью. Измерения проводились при комнатной температуре (25 °С) и при охлажденном SiPM до -32 °С. По результатам измерений характеристик SiPM, облученного нейтронами до флюенса $5,38 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, определены величины отношений сигнал-шум: $\sim 1,8$ при температуре 25 °С и ~ 20 при температуре -32 °С. SiPM MPPC S12571-015P был также облучен нейтронами до уровня $2,09 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Величина отношения сигнал-шум составила $\sim 1,8$ для охлажденного до -32 °С фотодетектора. Измерения при комнатной температуре не проводились из-за очень высокого уровня шумов с фотодетектора.

9. КОНСТРУКЦИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО МОДУЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

Группа ученых из ЛФВЭ ОИЯИ предложила новый метод создания многоканального модуля сцинтилляционного детектора. Был применен оригинальный способ светоизоляции тайлов в модуле, который отличен от метода, используемого при создании детектора АНСАЛ в коллаборации CALICE [13]. Предложено изготовить детектирующий модуль в виде моноблока, в котором выделено множество тайлов с помощью фрезерования продольных и поперечных узких канавок в плите сцинтиллятора. Тайлы модуля могут иметь любые формы и размеры. Разделительные канавки между отдельными тайлами заполняются непрозрачным составом со светоотражающим свойством, который обеспечивает светоизоляцию тайлов одного от другого. Светоотражающие экраны сцинтилляционного модуля выполнены в виде двух отдельных листов, прилегающих к плоским поверхностям модуля с двух сторон. В центре каждого тайла находится фокусирующая лунка. На модуль накладывается печатная плата с установленными на ней устройствами SiPM. Расположение фотодетекторов на плате выбрано таким, чтобы при наложении платы на плиту сцинтиллятора с тайлами центр SiPM совпадал с центром соответствующей лунки. Светоотражающий экран, который расположен между поверхностью блока тайлов с лунками и печатной платой с фотодетекторами, имеет отверстия, через которые устройства SiPM входят в соответствующие им лунки.

Для проведения исследований предложенной конструкции был создан модуль-макет, состоящий из облученных девяти (3×3) тайлов. На рис. 45 показаны девять тайлов с лунками и печатная плата с девятью SiPM.

Проведены исследования сцинтилляторов в радиационных полях высокой интенсивности [15]. Для исследования были выбраны образцы



Рис. 45. Модуль для исследований из девяти тайлов из облученного сцинтиллятора: а) печатная плата с установленными девятью SiPM; б) девять тайлов с лунками

сцинтилляторов (см. рис. 34) и образцы модулей из девяти тайлов (рис. 46). Образцы из сцинтилляторов SCSN-81, BC-408, EJ-260 и UPS-923A были изготовлены в Институте сцинтилляционных материалов НАН Украины (Харьков), а сцинтилляторы SC-301 и SC-307 — в ИФВЭ (Протвино).

Для измерения сигналов использовался SiPM типа MPPC S12572-015P, который имеет следующие характеристики:

- размер активной области 3×3 мм;
- количество пикселей 40 000;
- шаг между пикселями 15 мкм;
- геометрический коэффициент заполнения 53 %;
- показатель преломления входного окна 1,55;
- усиление $2,3 \cdot 10^5$ при рабочем напряжении ~ 69 В.

Максимум спектра чувствительности у S12572-015P равен ~ 450 нм. Взятые для исследования сцинтилляторы имеют следующие максимумы спектра излучения света: SCSN-81 — 440 нм, BC-408 — 425 нм, EJ-260 — 490 нм, UPS-923A — 425 нм, SC-301 — 420 нм и SC-307 — 416 нм.

В первую очередь была проведена взаимная калибровка с использованием мюонов одноканального и многоканального вариантов измерений (рис. 47). Ошибка измерений составила $\sim 4,8$ %.

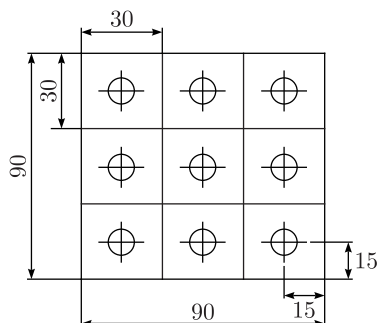


Рис. 46. Размеры образца модуля из девяти тайлов для выполнения исследования

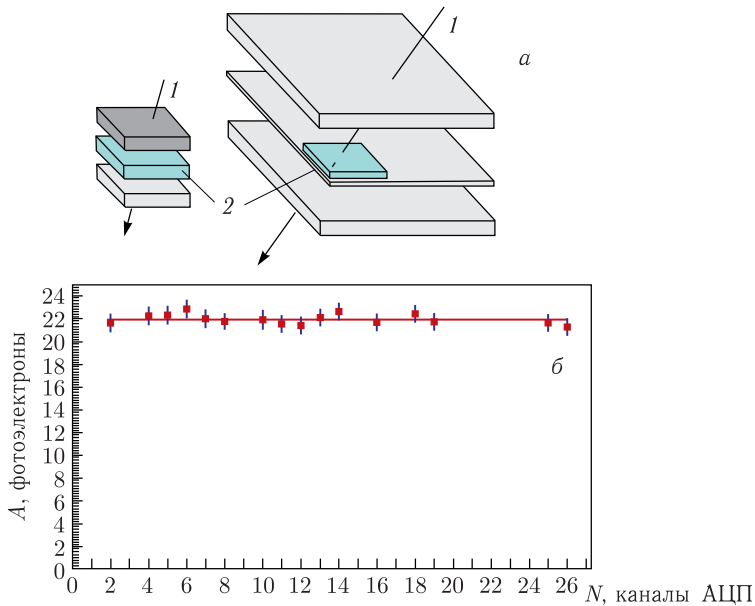


Рис. 47. а) Схема калибровки одиночного и девятиканального модуля: 1 — трек космического мюона; 2 — измеряемые образцы. б) Распределение выходных сигналов при калибровке девятиканального модуля

Таблица 1. Результаты измерений световыхода с тайлов, изготовленных из разных типов сцинтиллятора

Тип сцинтиллятора	Отражающее покрытие	Количество тайлов	Среднее значение распределения Гаусса, фотоэлектроны	Относительный световыход
Одиночные тайлы				
BC-408	ESR	10	$21,9 \pm 0,9$	1,00
EJ-260	ESR	9	$25,3 \pm 1,1$	1,16
UPS-923A	ESR	20	$19,9 \pm 0,7$	0,91
SC-301	ESR	10	$26,7 \pm 1,0$	1,22
SC-307	ESR	10	$24,4 \pm 0,7$	1,12
BC-408	Tyvek	10	$11,2 \pm 0,3$	0,51
EJ-260	Tyvek	10	$10,2 \pm 0,2$	0,47
UPS-923A	Tyvek	10	$11,6 \pm 0,5$	0,53
SCSN-81	Tyvek	10	$12,0 \pm 0,3$	0,55
Модули из 9 тайлов				
BC-408	ESR	18	$21,4 \pm 0,5$	0,98
UPS-923A	ESR	9	$17,4 \pm 0,7$	0,80
BC-408	Tyvek	9	$11,6 \pm 0,6$	0,53

Проведено измерение световыхода со всех тайлов, изготовленных из разных типов сцинтиллятора. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Для трех заранее облученных тайлов, обернутых отражающим материалом Tyvek, были проведены измерения световыхода в зависимости от поглощенной дозы (рис. 48). Тайлы были изготовлены из сцинтилляторов

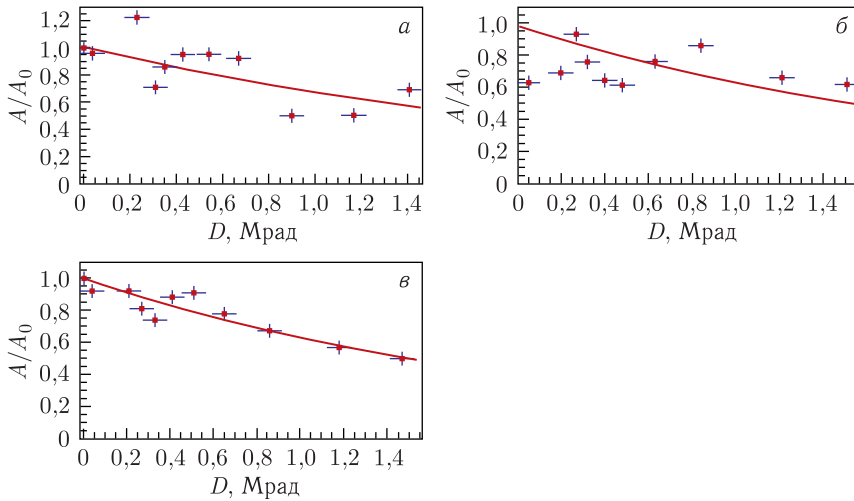


Рис. 48. Зависимости относительного световыхода от поглощенной дозы облученных тайлов для сцинтилляторов: а) BC-408; б) SCSN-81; в) UPS-923A

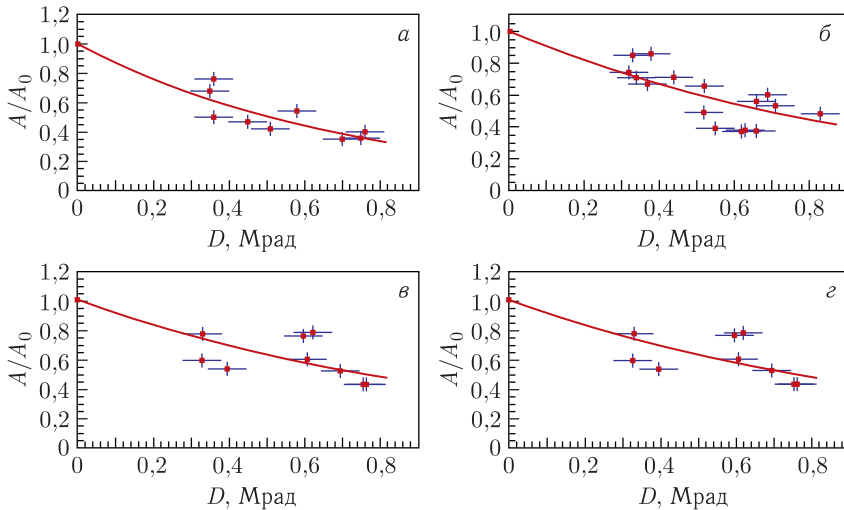


Рис. 49. Зависимости относительного световыхода от поглощенной дозы для тайлов, обернутых ESR, для четырех типов сцинтилляторов: а) SC-301; б) UPS-923A; в) BC-408; г) SC-307

BC-408, SCSN-81 и UPS-923A. Световыход для всех тайлов уменьшился в 2 раза при поглощенной дозе 1,5 Мрад.

Аналогичные измерения были выполнены для тайлов из сцинтилляторов SC-301, UPS-923A, BC-408 и SC-307, обернутых зеркальной пленкой ESR (рис. 49). Световыход для этих тайлов уменьшился более чем в 2 раза при поглощенной дозе 0,9 Мрад.

Следующие измерения были проведены для тайлов из сцинтиллятора EJ-260, максимум спектра которого находится в области зеленого света (рис. 50). Половина тайлов была обернута отражающим материалом Тувек, вторая — зеркальной пленкой ESR. По результатам измерений видно, что световыход для тайлов, обернутых отражающим материалом Тувек, практически не меняется вплоть до поглощенной дозы 1,2 Мрад. Световыход для тайлов, обернутых зеркальной пленкой ESR, уменьшается с увеличением поглощенной дозы.

При разработке вариантов создания тайла с фотодетектором, установленным в лунке тайла, была изучена зависимость световыхода с тайла от его толщины (рис. 51). Для этого были использованы тайлы из сцинтиллятора UPS-923A. Все образцы были обернуты зеркальной пленкой ESR. Для измерения световыхода использовался фотодетектор МРРС S12572-015Р. Результаты измерений приведены в табл. 2. Было изготовлено по пять тайлов каждого типа, что позволило уменьшить ошибку измерения.

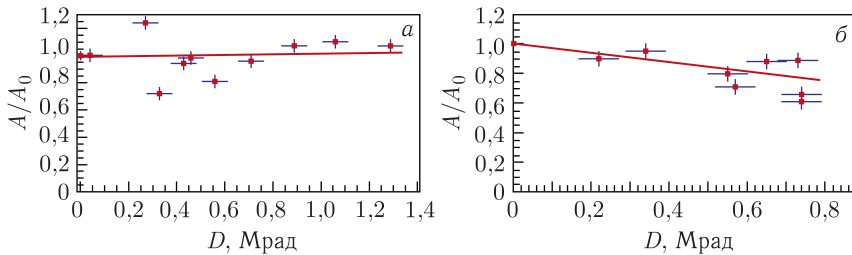


Рис. 50. Зависимости относительного световыхода от поглощенной дозы. Тайлы изготовлены из сцинтиллятора EJ-260, часть из которых обернута материалом Тувек (а), а часть — ESR (б)

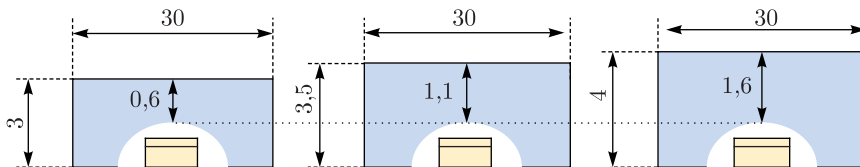


Рис. 51. Схематическое представление трех тайлов с лункой для фотодетектора, имеющих разную толщину: 3, 3,5, 4 мм

Таблица 2. Результаты измерений световыхода с тайлов, имеющих разную толщину

Толщина тайла, мм	Среднее по нескольким измерениям значение световыхода, фотоэлектроны
3,0	17,39
3,5	22,65
4,0	23,21

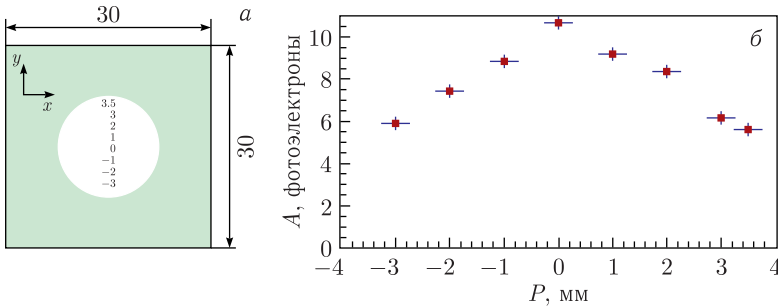


Рис. 52. а) Схематическое представление лунки в тайле и положение точек для измерения световыхода. б) Зависимость величины световыхода от положения SiPM относительно центра лунки

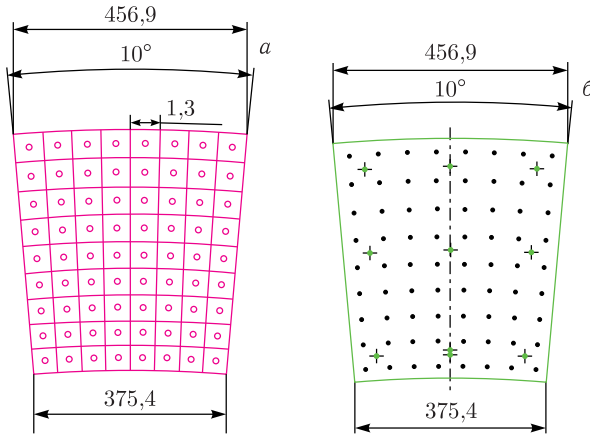


Рис. 53. Сцинтиляционная пластина с канавками и лунками (а) и печатная плата для размещения фотодетекторов и электроники считывания сигналов (б)

Определена зависимость величины световыхода от положения SiPM, имеющего размер 1×1 мм, в лунке тайла (рис. 52).

На рис. 53 показаны размеры сцинтиляционной пластины с канавками и лунками для светосбора и размеры печатной платы электроники

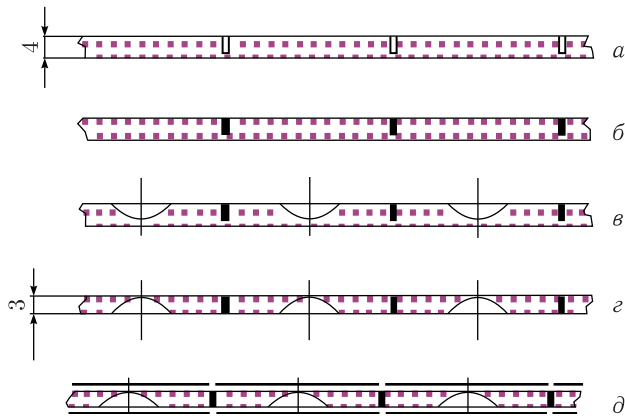


Рис. 54. Этапы формирования сцинтилляционных секций: *а*) фрезерование канавок; *б*) заполнение канавок непрозрачным составом; *в*) фрезерование углублений; *г*) удаление лишнего материала; *д*) приклеивание зеркальной пленки сверху и снизу

для размещения SiPM. Модуль такой формы может быть использован для организации кольцевого сцинтилляционного детектора.

Процесс изготовления моноблока тайлов состоит из нескольких этапов (рис. 54). Берется пластина сцинтиллятора толщиной 4 мм. В пластине фрезеруются продольные и поперечные канавки. Они заполняются непрозрачным составом (эпоксидной смолой с наполнителем из оксида титана TiO_2). Затем фрезеруются сферические углубления (лунки), и фрезерованием убирается слой сцинтиллятора таким образом, чтобы толщина моноблока стала равна 3 мм. На последнем этапе сборки модуля сверху и снизу сцинтилляционного моноблока устанавливаются отражатели, изготовленные из зеркальной пленки типа ESR. Со стороны углублений в пленке имеются отверстия для последующей установки фотодетекторов.

Наиболее привлекательной стороной такого изготовления тайлов и в целом модуля является простота их изготовления и сборки вместе с платой фотодетекторов и платой электроники регистрации сигналов (рис. 55).

Было изготовлено несколько тестовых модулей, составленных из девяти (3×3) тайлов. Исследовались модули, использующие моноблок сцинтилляторов, и модули, составленные из отдельных тайлов, обернутых зеркальной пленкой ESR. Сцинтилляторы в обоих модулях были типа UPS-923A. Результаты исследований приведены на рис. 56 и 57.

Среднее значение сигнала для модулей первого типа составляет 18,3 фотоэлектрона, для модулей второго типа — 20,1 фотоэлектрона.

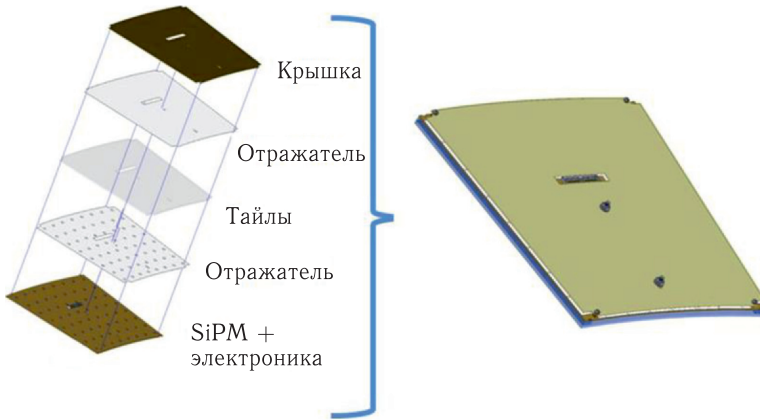


Рис. 55. Схема процесса сборки модуля

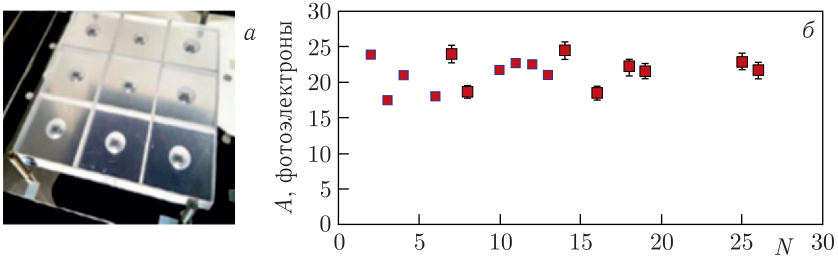


Рис. 56. а) Вид на моноблок тайлов, выделенных в пластине сцинтиллятора UPS-923A; б) зависимость световыхода от номера тайла в исследуемых моноблоках

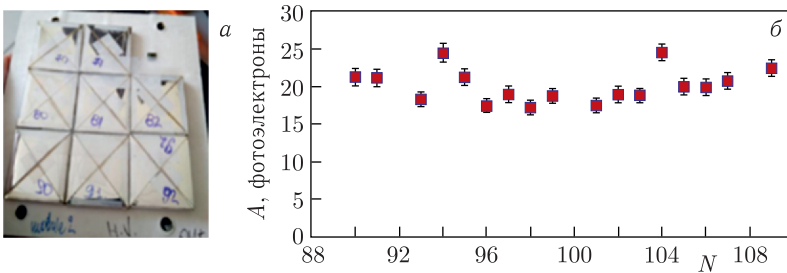


Рис. 57. а) Модуль, составленный из отдельных тайлов сцинтиллятора UPS-923A; б) зависимость световыхода от номера тайла в исследуемых модулях

Подобное исследование было проведено для сцинтиллятора BC-408, используемого в модулях двух типов. Результаты приведены на рис. 58 и 59. Среднее значение сигнала для модулей первого типа составляет 21,4 фотоэлектрона, для модулей второго типа — 21,9 фотоэлектрона.

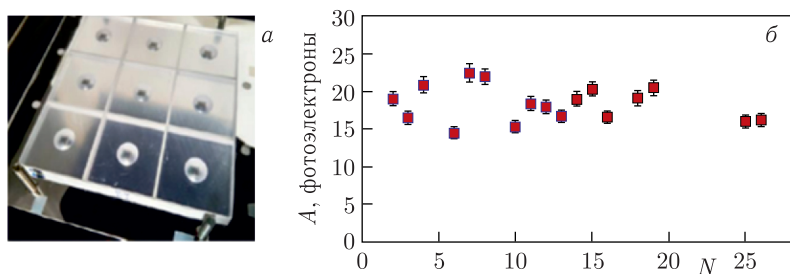


Рис. 58. а) Моноблок тайлов, выделенных в пластине сцинтиллятора BC-408; б) зависимость световыхода от номера тайла в исследуемых моноблоках

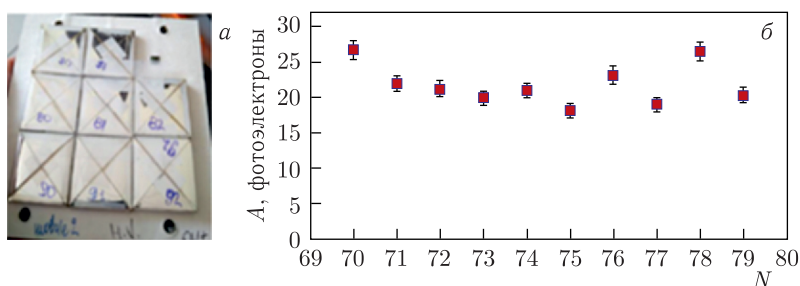


Рис. 59. а) Модуль, составленный из отдельных тайлов сцинтиллятора BC-408; б) зависимость световыхода от номера тайла в исследуемых модулях

Таблица 3. Значения световыхода с отдельных тайлов и входящих в состав модулей

Тип сцинтиллятора	Тип обертки	Количество тайлов	Среднее значение световыхода, фотоэлектроны	Относительный световыход
Отдельные тайлы				
BC-408	ESR	10	$21,9 \pm 0,9$	—
UPS-923A	ESR	17	$20,1 \pm 0,6$	—
Тайлы из модулей				
BC-408	ESR	14	$21,4 \pm 0,5$	0,97
UPS-923A	ESR	9	$18,3 \pm 0,6$	0,91

По результатам измерений была проведена оценка относительного световыхода с тайла, входящего в модуль. Относительный световыход нормировался на световыход с отдельного тайла, обернутого пленкой ESR и изготовленного из сцинтиллятора BC-408 (табл. 3).

Изучалось влияние перекрестной передачи света между соседними тайлами в модуле. При регистрации сигналов с модуля при облуче-

Таблица 4. Значения световыхода в тайлах, облученных до 0,8 Мрад

Тип сцинтиллятора	Тип обертки	Количество тайлов	Среднее значение световыхода, фотоэлектроны	Источник
BC-408	ESR	2	$9,30 \pm 0,15$	ИБР-2
EJ-260	ESR	3	$18,82 \pm 0,80$	
UPS-923A	ESR	2	$10,07 \pm 0,10$	
SC-301	ESR	2	$9,53 \pm 0,20$	
SC-307	ESR	2	$10,57 \pm 0,80$	

нии космическими мюонами эффект перекрестной передачи света составил 0,2%. При использовании для облучения модуля бета-частицы от радиоактивного источника этот эффект был равен 0,15%. Также изучалось влияние радиационного облучения на световыход отдельных тайлов вплоть до поглощенной дозы 0,8 Мрад (табл. 4).

Одним из методов улучшения характеристик модулей является охлаждение фотодетекторов. Ранее обсуждалось преимущество охлаждения до -32°C . Но использование охлаждения для всего модуля может привести к проблемам. Материалы, из которых изготовлен модуль, имеют разные коэффициенты теплового расширения. Сборка модуля происходит при комнатной температуре ($20\text{--}25^\circ\text{C}$), а рабочая температура $-32 \div -35^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплового расширения (КТР) органического сцинтиллятора в 5 раз выше КТР электронной платы, на которой смонтированы SiPM. Разность температур в 60°C может привести к смещению позиции фотодетектора относительно лунки тайла более 1 мм (рис. 60, 61). Минимизировать эффект теплового расширения можно, скорректировав положение SiPM на электронной плате при комнатной температуре и учитывая их последующий сдвиг при рабочей холодной температуре.

Для равномерного охлаждения платы электроники с SiPM и быстрого отвода тепла от работающих электронных элементов использу-

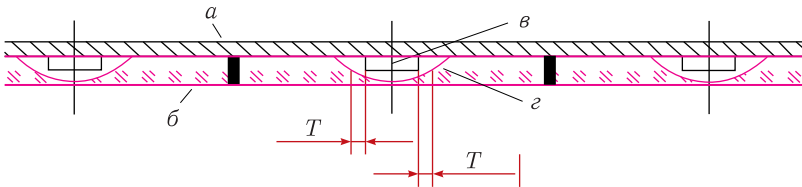


Рис. 60. Схематическое представление положения SiPM относительно лунки при комнатной и рабочей температуре: а) электронная плата с SiPM; б) моноблок тайлов; в) позиция SiPM при рабочей температуре; г) лунка в тайле; T — тепловой сдвиг $\sim 1,2$ мм

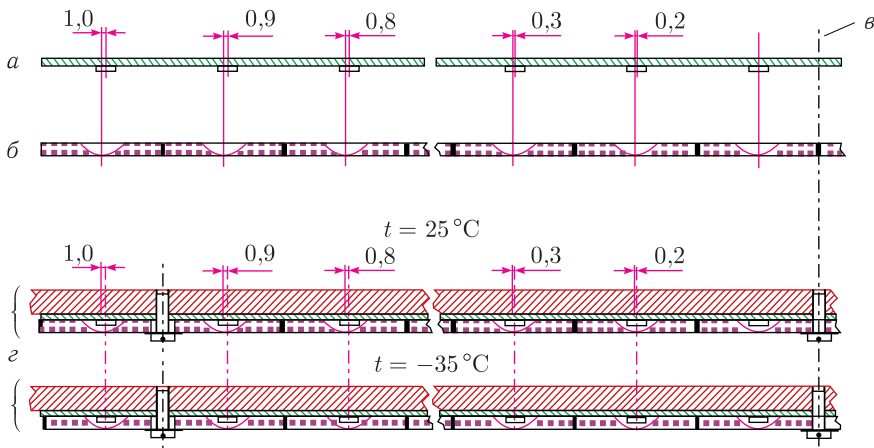


Рис. 61. Детальное схематическое представление модуля: а) плата электроники с SiPM; б) плата тайлов; в) линия, проходящая через центр моноблока; г) сборка из платы электроники, платы тайлов и панели охлаждения при нормальной и рабочей температурах

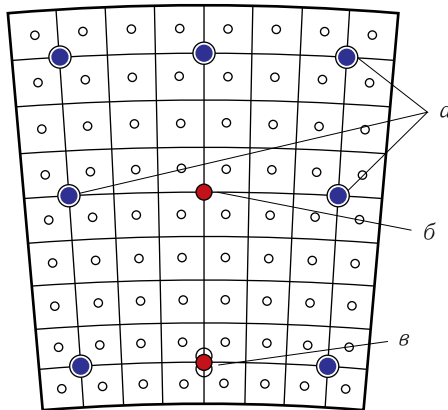


Рис. 62. Схема крепления элементов модуля: а) винты крепления; б) фиксатор 1; в) фиксатор 2

ется медная панель охлаждения (см. рис. 61). Точность сборки платы тайлов, платы электроники с SiPM и панели охлаждения обеспечивают два специальных фиксатора. Крепление этих элементов модуля выполняется винтами, которые вкручиваются в панель охлаждения (рис. 62). Для фиксатора 1 отверстия в моноблоке сверлятся точно по его диаметру. Для фиксатора 2 размер отверстия по азимуту строго равен его диаметру, а по радиальному направлению принимается допуск для теплового расширения плат. Отверстия под винты крепления по диаметру больше диаметра

винтов, чтобы обеспечить тепловое расширение от центра модуля. Таким образом, относительный сдвиг лунки и SiPM тем больше, чем дальше они находятся от центра платы.

По результатам этих исследований был изготовлен модуль сцинтилляционного детектора и был получен патент на это изобретение [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Группа ученых Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ проводила в течение 2012–2021 гг. исследования по разработке методов повышения радиационной стойкости детекторов, используемых в области физики частиц высоких энергий и создаваемых на основе органических пластических сцинтилляторов. Решение этой проблемы во многом связано с возможностью регистрации слабых сигналов, возникающих в сцинтилляторе при прохождении заряженной частицы, так как облученные сцинтилляторы теряют свою прозрачность и в них уменьшается число центров сцинтилляции. Первые наши работы были направлены на секционирование сцинтиллятора. Проводилось облучение секционированных сцинтилляторов радиоактивными источниками гамма-квантов и нейтронов до высоких уровней поглощенных доз. Были получены зависимости свойств сцинтиллятора от поглощенной им дозы облучения. Показана возможность увеличения радиационной стойкости секционированного тайла до суммарной поглощенной дозы 20 Мрад. При этом максимально возможное облучение несекционированных тайлов составляет 5 Мрад. Преимущество секционированных тайлов перед несекционированными сохраняется для любого типа облучения. Дальнейшее совершенствование радиационно стойких детекторов на основе органических сцинтилляторов было связано с появлением высокочувствительных кремниевых фотоумножителей. Небольшие размеры тайла (30 × 30 мм) и расположение SiPM непосредственно на поверхности сцинтилляционного тайла позволило значительно улучшить светосбор с отдельных тайлов за счет высокой чувствительности этого SiPM (квантовая эффективность — 50–60%) и размеров тайла. При разработке детектора нового типа был предложен и реализован новый метод светоизоляции тайлов, который намного практичнее и дешевле при массовом производстве, чем используемый коллаборацией CALICE. Кроме того, наши исследования показали, что работа сцинтилляционного детектора при низких температурах (до –35 °С) обеспечивает регистрацию слабых сигналов (до 10 фотоэлектронов) с тайлов при уровнях облучения 0,8 Мрад. Получен патент на изобретение сцинтилляционного детектора нового типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Longo E.* Calorimeters: Key Detectors for LHC Physics // J. Phys. 2009. V. 160. P. 012042.
2. *Biagtan E., Goldberg E., Harmon J. et al.* Effect of Gamma Radiation Dose Rate on the Light Output of Commercial Polymer Scintillators // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. V. 93. P. 296–301.
3. *Freeman J.* Hadron Calorimeters for Future Hadron Colliders // Proc. of Conf. “The Science and Culture Series — Physics, Innovative Detectors for Supercolliders”, Erice, Italy, 2004. P. 362–377.

4. *Afanasiev S. V., de Barbaro P., Golutvin I. A. et al.* Improvement of Radiation Hardness of the Sampling Calorimeters Based on Plastic Scintillators // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 717. P. 11–13.
5. *Afanasiev S. V., Boyarintsev A. Yu., Danilov M. V. et al.* Light Yield Measurements of “Finger” Structured and Unstructured Scintillators after Gamma and Neutron Irradiation // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 818. P. 26–31.
6. *Han S., Hu L., Liu N., Mao H. et al.* Radiation Hardness Tests of Tile/Fiber Calorimeter Structures for Calorimeter Structures for SDC. Fermilab-FN-596. Batavia, 1992. 23 p.
7. *Yoshitaka Takezawa, Shin-ichi Akasaka, Shuichi Ohara et al.* Low Excess Losses in a Y-Branching Plastic Optical Waveguide Formed through Injection Molding // Appl. Opt. 1994. V. 33, No. 12. P. 2307–2312.
8. *Afanasiev S. V., Emeliantchik I. F., Golutvin I. A. et al.* An Improvement of a Radiation Hardness of the CMS Hadron Endcap Calorimeters under Increased LHC Luminosity. CERN CMS Note-2012/002. 2012. 8 p.
9. *Afanasiev S. V., de Barbaro P., Bulavin M. V. et al.* Investigation of SCSN-81 Scintillator Irradiated by Neutrons. CERN CMS IN-2013/003. 2013. 4 p.
10. *Bodmann B., Holm U.* Neutron-Irradiated Plastic Scintillators // Nucl. Instr. Meth. B. 2001. V. 185. P. 299–304.
11. *Afanasiev S. V., Borzakov S. B., Egorov V. A. et al.* Experimental Study of the Plastic Scintillator Damage Caused by Radiation on IREN at JINR. CERN CMS Note-2014/003. 2014. 17 p.
12. *Afanasiev S. V., de Barbaro P., Borzakov S. B. et al.* Measuring of Induced Radioactivity of the HE Megatile on IREN at JINR. CMS Note-2014/002. 2014. 21 p.
13. *Sefkow F., Simon F.* A Highly Granular SiPM-on-Tile Calorimeter Prototype // Proc. of Conf. “CALOR 2018”, Eugene, OR, USA, 2018. P. 09281.
14. *Устинов В. В., Сухов Е. В., Афанасьев С. В. и др.* Изучение радиационной стойкости органических пластических сцинтилляторов // Учен. зап. физ. фак. МГУ. 2019. № 6. С. 1960202.
15. *Afanasiev S. V., Ershov Yu. V., Golutvin I. A. et al.* Stand for the Investigation Radiation Hardness of the Plastic Scintillators // Proc. of the 27th Symp. on Nuclear Electronics and Computing, Budva, Montenegro, 2019. P. 423–427.
16. Пат. на изобретение № 2748153. Сцинтилляционный детектор / *Афанасьев С. В., Бояринцев А. Ю., Голунов А. О. и др.* Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2021.